



Innovación de la Gestión de Manufactura en la Pyme Metalmecánica Productora de Bienes de Capital

Jesús David Castañeda A. Esp, M. Sc.



Vicerrectoría de Investigaciones y Desarrollo Tecnológico
Facultad de Ingeniería
Grupo de Investigación en Competitividad y Productividad Empresarial



Los Cuadernos de Investigación y Divulgación son una publicación de la Vicerrectoría de Investigaciones y Desarrollo Tecnológico de la Universidad Autónoma de Occidente.

El propósito de este material es divulgar los resultados de investigaciones, revisiones temáticas, estudios y reflexiones realizadas por docentes de la Institución.

INNOVACIÓN DE LA GESTIÓN DE MANUFACTURA EN LA PYME METALMECÁNICA PRODUCTORA DE BIENES DE CAPITAL

ISSN 1692-2832

Grupo de Investigación en Competitividad y Productividad Empresarial
Primera Edición, abril de 2006

Investigador

Jesús David Castañeda Andrade, Esp, M. Sc.

Diagramación

Henry Quintero

Impresión

CARGRAPHICS S.A.
Cali-Colombia

Gestión editorial

Vicerrectoría de Investigaciones y Desarrollo Tecnológico
pabadia@uao.edu.co

2006 Universidad Autónoma de Occidente

Km. 2 vía a Jamundí – Conmutador: 3188000, A.A. 2790 Cali, Valle del Cauca - Colombia. www.uao.edu.co - investig@uao.edu.co

El contenido de esta publicación no compromete el pensamiento de la Institución, es responsabilidad absoluta de su autor.

Impreso en Colombia
Printed in Colombia



CONTENIDO

	pag.
INTRODUCCIÓN	9
1. HERRAMIENTAS DE INNOVACIÓN	11
1.1 CONCEPTO DE PROCESO	12
1.2 MEJORAMIENTO DE LOS PROCESOS	13
1.2.1 Descripción de la metodología	15
1.2.2 Análisis de las condiciones actuales	17
1.2.3 Implantación de soluciones temporales de contención	37
1.2.4 Detección de las causas más importantes	38
1.2.5 Propuesta de alternativas	41
1.2.6. Comprobación de resultados	41
2. SECUENCIACIÓN Y PROGRAMACIÓN DE CICLOS DE FABRICACIÓN	43
2.1 INTRODUCCIÓN	43
2.2 ORDEN DE TRABAJO	44
2.3 ELABORACIÓN DE UNA ORDEN DE TRABAJO	45
2.4 ANÁLISIS DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LA PIEZA	47
2.4.1 Planos	49
2.4.2 Información geométrica	50
2.4.3 Información tecnológica	50
2.4.4 Información general	59
2.5 SELECCIÓN DE LA MATERIA PRIMA	60
2.6 DETERMINACIÓN DE LAS OPERACIONES DE FABRICACIÓN Y SU SECUENCIA	60
2.7 SELECCIÓN DE LA MÁQUINA HERRAMIENTA	61
2.8 SELECCIÓN DE HERRAMIENTAS, DISPOSITIVOS DE SUJECIÓN Y EQUIPO DE MEDICIÓN	66
2.9 CICLOS DE FABRICACIÓN	67
2.10 ESTUDIO DEL CICLO DE FABRICACIÓN	67
2.10.1 Hoja de ruta o diagrama de proceso	70
2.10.2 Hoja de operaciones	70
2.10.3 Hoja de fabricación o de proceso	71
2.11 TIEMPOS DE CICLO DE FABRICACIÓN	72
2.11.1 Tiempo de alistamiento	73
2.11.2 Tiempo de mecanizado	74
2.11.3 Tiempo de posicionamiento	74



2.12 DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA MATIC	77
3. ALGORITMOS PARA PROGRAMACION DE TAREAS	81
3.1 PROCEDIMIENTO PARA SOLUCIONAR UN PROBLEMA DE PROGRAMACIÓN	81
3.2 ACTIVIDADES	82
3.3 RECURSOS	82
3.3.1 Una sola máquina	83
3.3.2 Máquinas paralelas	83
3.3.3 Taller de producción continua	83
3.3.4 Taller de producción intermitente	83
3.3.5 Talleres abiertos	83
3.4 OBJETIVO DE LA PROGRAMACIÓN	84
3.5 OBJETIVOS SUSTITUTOS	84
3.6 ALGORITMOS DE PROGRAMACIÓN	85
3.7 MODELOS UTILIZADOS PARA PROGRAMAR UNA MÁQUINA	86
3.7.1 Algoritmo para tiempo de flujo mínimo	86
3.7.2 Algoritmo para tardanza máxima y retraso máximo	88
3.7.3 Algoritmo para minimizar el número de trabajos tardíos	88
3.7.4 Algoritmo para minimizar la tardanza mínima	90
3.7.5 Algoritmo de adelanto y tardanza mínimos con fecha de entrega común	91
3.7.6 Programación dinámica	94
3.7.7 Tiempos de preparación dependientes de la secuencia	94
3.7.8 Métodos de búsqueda de una sola máquina	98
3.8 PROGRAMACIÓN DE “n” TRABAJOS EN “m” MÁQUINAS	101
3.8.1 Máquinas en paralelo	101
3.8.2 Máquinas en serie	104
BIBLIOGRAFÍA	106



LISTA DE TABLAS

	pag.
Tabla 1.1	Ejemplo de tabla de conteo por variable 21
Tabla 1.2	Ejemplo de tabla de datos de variable por período y frecuencia 21
Tabla 1.3	Ejemplo de tabla de datos acumulativos y porcentuales 21
Tabla 1.4	Valores resultantes de la inspección de un producto durante 4 semanas 23
Tabla 1.5	Tipos de gráficas de control 24
Tabla 1.6	Límites de control estadístico para gráficas de control de variables 26
Tabla 1.7	Coeficientes para determinar los límites de control estadístico de la tabla 1.6. (n es el tamaño de la muestra) 27
Tabla 1.8	Factores para construir cartas de control de variables 29
Tabla 1.9	Tipos de gráficas de control de atributos 34
Tabla 1.10	Límites de control estadístico para gráficas de control de atributos 35
Tabla 1.11	Ejemplo de tabla de conteo del número de observaciones de los defectos más relevantes presentes en los tornillos. 37
Tabla 1.12	Modelo para comprobar la relevancia de una causa 42
Tabla 1.13	Modelo para realizar la valoración técnica 42
Tabla 1.14	Modelo para realizar la valoración de soluciones 42
Tabla 2.1	Símbolos utilizados para designar tolerancias geométricas. 53
Tabla 2.2	Valores normalizados de rugosidad y su equivalencia. 58
Tabla 2.3	Datos básicos de tipos de máquinas herramienta 64
Tabla 2.4	Costo unitario, desperdicio y tiempo muerto de fabricación para varias tecnologías. 65
Tabla 2.5	Tabla de distribución normal 68
Tabla 2.5	Tabla de distribución normal (continuación). 68



LISTA DE FIGURAS

	Pag.
Figura 1.1 Modelo de un proceso de fabricación	13
Figura 1.2 Procedimiento para mejorar o innovar el proceso de fabricación durante la etapa de producción	14
Figura 1.3 Modelo de diagrama de flujo	18
Figura 1.4 Modelo de hoja de operación	19
Figura 1.5 Modelo de formato para reporte de producción	20
Figura 1.6 Modelo de formato para reporte de no conformidades	20
Figura 1.7 Ejemplo de diagrama de tendencia. Comportamiento de los defectos encontrados durante la revisión diaria de un lote de piezas de 200 unidades. La media se ubica en 5. Del análisis de la gráfica no se detecta ningún patrón o tendencia.	24
Figura 1.8 Pieza para mecanizar para el ejemplo 1.2	28
Figura 1.9 Diagrama de promedios y rangos para el ejemplo 1.2	32
Figura 1.10 Tres casos de índices de capacidad: $C_p > 1$, el proceso asegura que el producto esta bajo especificaciones ; $C_p < 1$, el producto es aceptable; $C_p = 1$, no hay garantía de que los productos estén dentro de las especificaciones	33
Figura 1.11 Diagrama de Pareto. Tipos de defectos más frecuentes presentes en el perno de acero inoxidable: A: Dureza fuera de especificación; B: Cabezas rotas; C: Longitud; D: Tamaño de la cabeza; E: Rosca imperfecta; F: Otros.	37
Figura 1.12 Ejemplo de diagrama causa-efecto para determinar las posibles causas de las no conformidades presentadas durante el proceso de fabricación de un producto metalmecánico	40
Figura 2.1 Secuencia de programación y decisiones de taller en una empresa metalmecánica	46
Figura 2.2 Procedimiento para la elaboración y programación de una orden de trabajo para un proceso metalmecánico. a) Método tradicional b) Pasos cuando se documenta el proceso	47
Figura 2.3 Ejemplo de plano de una pieza donde se indica la información general o global, dimensional, geométrica y tecnológica.	48
Figura 2.4 Ejemplo de identificación de superficies de referencias	51
Figura 2.5 Ejemplo de tolerancias dimensionales. a) unilaterales b) bilaterales c) sistema ISO	51
Figura 2.6 Ejemplo de tolerancias geométricas aplicadas a dimensiones teóricas exactas (valor dentro de un cuadro), de posición con respecto a 2 superficies A y B, y tolerancia dimensional norma ISO	54
Figura 2.7 Tolerancia geométrica localizada sobre una proyección del elemento	55





Figura 2.8	Diferentes formas de indicar la condición de material máximo en la especificación de la tolerancia geométrica. a) después del valor de tolerancia. b) después de la letra del elemento. c) después de ambos. d,e) aplicado a la superficie de referencia.	55
Figura 2.9	Posibles orientaciones de superficies mecanizadas y su representación en planos	56
Figura 2.10	Símbolos con indicación del principal criterio de rugosidad Ra	
Figura 2.11	Operaciones dependientes una de otra a) primero se hace el taladrado y luego el fresado porque el agujero no tiene especificaciones exigentes b) el agujero 2 debe hacerse antes que el agujero 1 para evitar la flexión de la pieza.	61
Figura 2.12	Modelo de diagrama de flujo o de proceso	71
Figura 2.13	Modelo de hoja de operación	72
Figura 2.14	Modelo de hoja de fabricación	73
Figura 2.15	Estimación de parámetros para operaciones de fresado	75
Figura 2.16	Estimación de parámetros para algunas operaciones de torno	76
Figura 2.17	Estimación de parámetros para algunas operaciones del cepillo y limadora	76
Figura 2.18	Pantalla principal del programa MATIC, utilizado para calcular los tiempos de fabricación de una pieza metalmecánica	77
Figura 2.19	Operaciones que se pueden realizar en una máquina. Ejemplo para un torno	78
Figura 2.20	Ejemplo de selección de unidades y de operación por realizar, desbaste o acabado, para una operación de cilindrado externo	78
Figura 2.21	Ejemplo de pantalla para especificar las condiciones de mecanizado para una operación de cilindrado externo	79
Figura 2.22	Ejemplo de pantalla resumen de la operación de desbaste de cilindrado exterior.	80
Figura 3.1	Representación esquemática del algoritmo de ramificación y acotamiento. Aij:nodo del árbol, Ai=j,j=i : nodo prohibido, Csis : Lapso cuando se sigue la secuencia ij, Csir : lapso para el nodo prohibido	98





I N T R O D U C C I Ó N

Cada día los países desarrollados dejan atrás procesos que son poco rentables o muy costosos, especialmente los intensivos en mano de obra y bajo o regular valor agregado que son aquellos en que está concentrada la mayor parte de la producción metalmecánica, específicamente en las pequeñas y medianas empresas. Por tal motivo, si la industria metalmecánica quiere desarrollarse debe buscar una cadena productiva y formar parte de ella, cambiando el método de integración vertical al de horizontal, con el correspondiente auge de la subcontratación. Este modelo proporcionará a las Pyme metalmecánicas ventajas que antes no tenían. Si las Pyme metalmecánicas captan esta nueva realidad, entenderán que tienen una gran oportunidad de formar parte de la cadena internacional de subcontratación, la cual no solo garantiza mercado, sino que minimiza el acceso a la tecnología, el cual constituye el clásico cuello de botella por su alto costo, y aprenderán del proceso de calidad que necesariamente estos eslabones tendrán que implementar para evitar bajar los estándares de los bienes terminados.

Por lo anterior, el propósito de esta investigación es aportar herramientas que permitan conocer el estado del proceso de fabricación y proponer técnicas de innovación que impulsen el desarrollo tecnológico de las empresas de metalmecánica, especialmente las productoras de bienes de capital, para que en un futuro cercano hagan parte de una cadena internacional de subcontratación.





1. Herramientas de innovación

Hasta el inicio del siglo XX, las industrias tanto de bienes como de servicios, tenían una orientación hacia el producto, lo cual generó sistemas de producción en las industrias y de operación en las empresas de servicios, encaminadas a aumentar su productividad con base en el incremento del número de bienes producidos o de servicios prestados. El objetivo era el producto y las soluciones que surgieron de tal perspectiva conducían a la inspección del producto final.

Para solucionar los problemas de calidad del producto, los gerentes de planta crearon el cargo de inspectores dentro de los departamentos de producción, dedicados a detectar mediante inspección y auditorias los productos defectuosos con el fin de procesarlos o desecharlos antes de que llegaran al consumidor, generando grandes pérdidas de recursos y de potencial de la gente involucrada en el sistema, ya que se inspeccionaba el producto pero no se preocupaban por elaborar mejores productos.



Esto condujo a un énfasis y orientación creciente hacia la importancia de los procesos de fabricación con responsabilidad esencial de la gerencia de la empresa para lograr una mayor competitividad de la organización.

1.1 Concepto de proceso

Se entenderá como “proceso” un sistema constituido por flujo de material, flujo de información y flujo de energía, figura 1.1. El flujo de material esta asociado a la materia prima; el de energía tanto a la potencia necesaria para procesar la materia prima, como a la requerida para mover los dispositivos y herramientas que participan en la conformación del producto y el flujo de información se refiere a las características de forma, información geométrica, información de propiedades e información tecnológica. Estos tres flujos interactúan entre si, generando un modelo sistémico de proceso de manufactura por remoción de material.

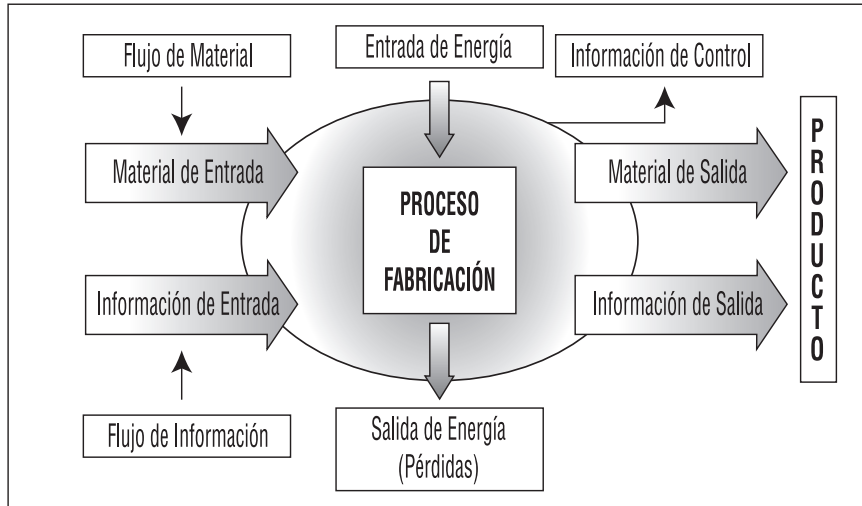
Los procesos por remoción de material son aquellos en los cuales la configuración o forma del componente final se logra por fractura dúctil o frágil. Para remover el material es necesario que exista un movimiento relativo entre la pieza y una herramienta de corte cuya dureza supere significativamente la dureza del material trabajado. Las máquinas que proporcionan este movimiento relativo entre la pieza y la herramienta se denominan máquinas herramienta. Pertenecen a esta categoría los tornos, taladrados, cepillos, fresadoras, brochadoras, rectificadoras, entre las mas importantes.

Un proceso de manufactura implica diferentes actividades independientes formadas por elementos como materiales, herramientas, máquinas, energía y personal. La manufactura es de hecho un sistema complejo, porque está formado por elementos físicos y humanos, algunos de los cuales son difíciles de pronosticar y controlar como el suministro de materias primas, el costo de las mismas, los cambios en el mercado, la conducta y el desempeño del personal.





Figura 1.1 Modelo de un proceso de fabricación



De igual manera, la demanda de un producto puede fluctuar de forma aleatoria y rápida debido a su estilo, tamaño o capacidad. El sistema debe ser capaz de sacar el producto modificado con menor tiempo de demora, y de preferencia con una inversión de capital en máquina y herramienta relativamente pequeña.

1.2 Mejoramiento de los procesos

El mejoramiento de los procesos implica, tanto el enfoque evolutivo como el de innovación, figura 1.2. El mejoramiento¹ involucra un cambio en la manera como se asume el trabajo. Además de realizarlo en equipo², cada trabajador debe transformar sus hábitos personales, garantizar calidad en el trabajo diario, de tal manera que genere mejora o innovación en la forma como este se lleva a cabo. Un procedimiento inicial para cambiar el comportamiento de los trabajadores motivando un ambiente de economía, organización, limpieza, salud y disciplina, se conoce como las cinco Ss, el cual se resume como sigue:

¹ Mejoramiento incremental a pequeña escala pero constante, para lograr mejora en los procesos, trabajando con el conocimiento, la experiencia y las habilidades de las personas involucradas en el.

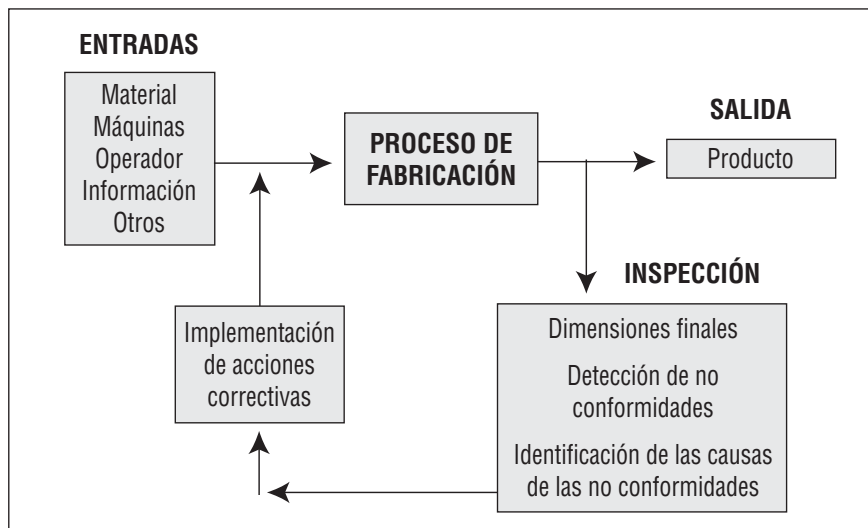
² Personas comprometidas que comparten los mismos objetivos, ideales, valores y que actúan totalmente integrados en un ambiente de confianza y seguridad.



Clasificación: cada equipo, herramienta y material que se necesite en los puntos de trabajo debe identificarse adecuadamente y así disponer de la información necesaria para la toma de decisiones y para que cada trabajador emplee los elementos estrictamente necesarios para desarrollar su labor.

Orden: cada elemento de trabajo debe ubicarse en un lugar específico, de tal manera que puedan localizarse fácilmente en cualquier momento. Esto incluye el manejo de datos e información en archivos físicos y electrónicos.

Figura 1.2 Procedimiento para mejorar o innovar el proceso de fabricación durante la etapa de producción.



Limpieza: un sitio de trabajo limpio, libre de polvo, suciedad y objetos no indispensables, facilita la labor y estimula su desarrollo.

Salud: la práctica de buenas condiciones sanitarias, higiénicas y estéticas en el sitio de trabajo, sin ningún tipo de contaminación, garantizan la buena salud y promueven el cuidado y prevención de enfermedades de los trabajadores.

Autodisciplina: cada trabajador debe cumplir con los procedimientos establecidos por la empresa para garantizar su bienestar, primero como persona y después como colaborador de la organización.

Una vez se ha realizado el procedimiento de las 5ss, se pasa a la aplicación de las herramientas que permiten establecer las debilidades que poseen los procesos y a partir de ellas generar métodos innovadores que produzcan ade-



lentos en el proceso de fabricación. Con este fin se han desarrollado dos tipos de herramientas: las básicas y las técnicas. El primer grupo esta constituido por métodos diseñados para el análisis de datos, el análisis de posibles causas que afectan el proceso y el control del proceso, entre otros. El segundo grupo denominado “técnicas de planeación y gerencia” facilitan la realización de planes de desarrollo como anticipar anormalidades, establecer relaciones, planear la asignación de recursos, y programar actividades con criterios definidos.

Las herramientas recomendadas para determinar las falencias del proceso de fabricación se conocen como “técnicas de control de calidad”; comprenden el análisis de Pareto, diagrama causa- efecto, lista de chequeo, diagrama de flujo, histograma, diagrama de dispersión y gráficos de control.

1.2.1 Descripción de la metodología. La metodología estadística de análisis y solución de problemas es una herramienta práctica y acorde con el nivel de preparación de las personas que laboran en la empresas y aplicable a cualquier nivel de la organización. Sus características más relevantes son:

- Se aplica a la solución de cualquier tipo de problema y proyectos de mejora o innovación. Aunque, en ocasiones se hacen algunas modificaciones a la metodología planteada.
- Se puede trabajar en equipo o en forma individual.
- Se aplica a problemas crónicos y urgentes.
- Aplicable a todos los niveles de la organización.
- Cuando se aplica adecuadamente, los problemas se resuelven exitosamente.
- Es una guía importante en el trabajo de equipos de mejora o innovación.

El uso cotidiano de esta metodología estimula el desarrollo de la competencia para resolver cualquier situación y fomenta la capacidad para la toma de decisiones y acciones con base en hechos reales.

1.2.1.1 Conocimiento del Proceso por estudiar. Para iniciar cualquier tipo de estudio es necesario conocer el proceso de fabricación. Para estudiarlo de manera detallada, se describe mediante símbolos, líneas y palabras simples, mostrando las actividades que se realizan, desde la condición de



partida hasta la ejecución final, se estudian también las relaciones entre las diferentes operaciones indicando como se hacen y en que secuencia se desarrollan. El proceso de fabricación puede analizarse mediante un diagrama de flujo, el cual presenta una secuencia lógica de las diferentes actividades que lo componen, figura 1.3, o de una hoja de operación, figura 1.4, donde se describen paso a paso las operaciones necesarias para la fabricación de una pieza metalmeccánica.

La importancia de un diagrama de flujo y de una hoja de operación radica en ser un medio para que todas las personas relacionadas con el proceso de fabricación tengan una visión clara y acertada acerca de las principales actividades que constituyen el proceso de fabricación. Esto permite detectar donde no hay claridad sobre lo que se debe hacer y lo que en realidad se hace. Además, esta herramienta es un método eficaz para capacitar a las personas con poca experiencia en este tipo de proceso y un medio de documentación muy valioso.

1.2.1.2 Definición del Problema. Cuando se libera una orden de trabajo al taller de fabricación, el objetivo principal es elaborar el producto en el tiempo correcto, en las cantidades solicitadas y con las especificaciones establecidas por el cliente. Sin embargo, durante el proceso de fabricación pueden ocurrir muchos eventos que afectan la programación y la calidad del producto, tales como: falla de la máquina herramienta, desgaste y rotura de la herramienta, ausencia de trabajadores, producto fuera de especificaciones, etc.

Para expresar correctamente el problema es importante definirlo con los datos que se tengan disponibles, tratando de describir lo mejor posible la anomalía que se ha detectado. El objetivo es clasificar el problema en su verdadera dimensión, establecer si es real, general o particular. Será real si el problema planteado afecta al producto o genera anomalías en el proceso de fabricación; general si se presenta en todos los casos o no hay un patrón que lo pueda particularizar; o no se relaciona con algún tipo de cliente, producto, unidad, etc.; y será particular si alguna de las variables seleccionadas lo establecen, por ejemplo: sucede un día determinado de la semana, con un producto específico, etc.

Para minimizar el impacto de estos eventos (problemas) sobre el proceso de fabricación, se debe disponer de métodos que faciliten la rápida y eficiente recolección de datos con el fin de ejercer acciones correctivas en unos casos, y de mejoramiento en otros que permitan generar innovaciones en el proceso reduciendo las no conformidades.



1.2.2 Análisis de las condiciones actuales. Para el análisis del proceso de fabricación actual se requiere de la aplicación de una metodología que permita la recopilación de datos acerca de los problemas que afectan el proceso. El método aplicado se debe iniciar con la elaboración y análisis de un diagrama de flujo. Mediante esta gráfica se tiene un entendimiento de las actividades que caracterizan el proceso, además, facilitan la utilización de herramientas orientadas a detectar anomalías en el proceso, así como, alternativas de solución.

Conocido el proceso, comienza la etapa de adquisición de datos estadísticos de aquellas variables que afectan el proceso de fabricación. Esta actividad implica la consulta de reportes acerca del desarrollo del proceso productivo, de problemas presentados durante la producción de piezas y de imperfecciones (defectos) presentes en el producto final.

La información se puede obtener mediante reportes escritos a mano, lectores de códigos de barras, sensores, terminales para entrada manual de datos, sistema de entrada de datos mediante voz, etc., dependiendo del tipo de empresa. Esta información se muestra a diario y se actualiza varias veces por semana. Sea cual fuere el sistema de recolección de información que posea la empresa, esta se debe registrar en formatos especiales. En estos formatos se recopilan las novedades que se presentan durante la producción y las no conformidades (defectos) más frecuentes presentes en las piezas fabricadas. Las figuras 1.5 y 1.6 son ejemplos de formatos especiales.

Figura 1.3 Modelo de diagrama de flujo

Nombre de la pieza _____		Plano No _____		Resumen			
_____		Hoja de _____		○ Operación			
Nombre del conjunto _____		Fecha _____		⇒ Transporte			
_____		Responsable _____		□ Inspección			
Cliente _____		Tiempo de manufactura _____		D Retrazo			
_____		horas min _____		▽ Almacenamiento			
Recorrido mts	Tiempo min.	Actividades				No.	Descripción de la actividad
		○	⇒	□	D	▽	
OBSERVACIONES _____							

La información generada por los eventos que suceden durante el proceso de fabricación y registrada en los formatos especiales, se agrupa de acuerdo a los problemas que se desea investigar. Para este fin se elaboran formatos de conteo de datos por variable, tabla 1.1, de datos de variable por período y su frecuencia, tabla 1.2, de variables (defectos, no conformidades, etc.) con datos acumulativos y porcentuales, individuales y totales, tabla 1.3. En algunas ocasiones es necesario diseñar formatos para recopilar dicha información.

El objetivo de este paso es saber cómo sucede, cómo se manifiesta, cuándo se presenta, si sucede con todos los clientes, en todos los casos, o se puede particularizar con un cliente específico, o de unidades, en algunos días de la semana, etc. A esta etapa del desarrollo del problema, se debe disponer de información confiable, si no la hay, se debe generar tan rápido como sea posible mediante encuestas o revisando documentos donde se relacionan las eventualidades presentadas durante el desarrollo del proceso de fabricación. Un procedimiento útil para recolectar información es recurrir a una votación razonada³ de personas que son afectadas por el problema.

³ Técnica útil para la toma de decisiones a nivel grupal, donde se aprovecha la experiencia y conocimiento que las personas tienen sobre el proceso analizado.



Figura 1.4 Modelo de hoja de operación

Empresa		Nombre de la pieza		Material		Dimensiones	
Código		Plano No		Hoja No		Cantidad	
Op No.	Descripción de la operación	Taller	Máquina	Dispositivo	Herramienta	Instrumento medición	Tiempo

Códigos: Instrumentos de medición Calibrador pie de rey (CPR), Micrómetro (M), Calibres (C).
Máquinas Torno (T), Fresadora (F), Torno de control numérico (CNC), Centro de mecanizado (CM), Taladro (TA)
Sierra mecánica (SM), Cepillo puente (CP), Rectificadora (R), Limadora (L).
Taller Banco (B), Fresadoras (ZF), Tornos (ZT), Control numérico (ZCNC).

OBSERVACIONES _____

Obtenidos los datos estadísticos, se elabora la gráfica de tendencia, para visualizar el comportamiento de las no conformidades (anormalidades, defectos, etc.) durante un período específico; las gráficas de control, para determinar si la variabilidad del proceso se debe a causas aleatorias y si está bajo control estadístico; el diagrama de Pareto, para establecer los pocos vitales (variables de mayor ocurrencia) y los muchos triviales (Variables de menor ocurrencia).



Figura 1.5 Modelo de formato para reporte de producción

EMPRESA

Reporte de producción Día ___ Mes ___ Año ___ Turno 1 ___ 2 ___ 3 ___

Máquina _____ Operario _____

Orden de trabajo	Denominación	Código pieza	T _{fe} ¹	T _{fr} ²

¹ Tiempo estimado de fabricación ² Tiempo de fabricación real

Tiempo disponible de la máquina horas Minutos

OSERVACIONES _____

Figura 1.6 Modelo de formato para reporte de no conformidades

EMPRESA

Orden trabajo	Denominación	Máquina	No conformidades				T _{fr}
			Tolerancia	Acabado Superficial	Conicidad	Circularidad	

Resumen de no conformidades Mes _____ Año _____ Planta _____

ANÁLISIS _____

RECOMENDACIONES _____



Tabla 1.1 Ejemplo de tabla de conteo por variable

Variables	Conteo	total

Tabla 1.2 Ejemplo de tabla de datos de variable por período y frecuencia

Variable:			
Período (tiempo)	Frecuencia	Período (tiempo)	Frecuencia

Tabla 1.3 Ejemplo de tabla de datos acumulativos y porcentuales

Variables	Totales individuales	Totales acumulados	Composición porcentual	Porcentaje acumulado

El paso siguiente es analizar los problemas encontrados y determinar mediante un diagrama causa-efecto la fuente que los origina. Estas causas se categorizan en un diagrama de Pareto. Terminado este proceso se elaboran las propuestas para mejorar o innovar el proceso de fabricación, todas ellas orientadas a corregir o disminuir las anomalías que se presentan durante el proceso productivo y los defectos en el producto final.

1.2.2.1 Diagrama de tendencias. Se denomina también diagrama de seguimiento, permite visualizar el comportamiento (tendencias) de las causas que originan las no conformidades o anomalías del proceso con el fin de determinar la existencia de ciclos, estacionalidades u otros patrones a lo largo del tiempo. En un diagrama de tendencia se espera que los datos varíen aleatoriamente hacia arriba y hacia abajo de la línea media.



Para la construcción del diagrama de tendencia se debe tener en cuenta lo siguiente:

- Seleccionar el proceso y las variables por medir.
- Definir un periodo y establecer un intervalo de tiempo para realizar la medición, ejemplo: por día, por mes, etc.
- Trazar el eje vertical a la izquierda indicando el número de ocurrencias, desde 0 hasta los valores más altos. Estos representan el valor a medir.
- Trazar el eje horizontal en la base y establecer los límites de tiempo a lo ancho del eje. Marcar el eje.
- Marcar y conectar los puntos a medida que ocurren.
- Calcular la media o mediana para establecer la tendencia.
- Analizar el diagrama buscando tendencias y comportamientos; buscar una distribución uniforme de los puntos alrededor de la media o mediana, o cualquier anomalía que pueda indicar problemas en el proceso de fabricación. En síntesis buscar características importantes y relativas del diagrama

El diagrama de tendencia es una representación de datos a través del tiempo, la cual puede o no corresponder a un patrón o tendencia. Busca comportamientos, entendidos, como un punto individual o una serie de datos consecutivos al mismo lado de la línea media (promedio). Determinar el número de comportamientos⁴ permite establecer si el proceso está siendo afectado por causas especiales. Una tendencia es una serie de disminuciones y aumentos consecutivos, la cual no podrá ser demasiado larga en caso de presentarse, el proceso se debe analizar para determinar las causas que la producen. Los datos deben reportarse en el orden en que fueron obtenidos.

Ejemplo 1.1: La empresa Inox. S.A. desea verificar el estado de un lote de 200 ejes antes de ordenar su embarque. Para ello dispone de 4 semanas (20 días). De acuerdo a los resultados obtenidos de la inspección registrados en la tabla 1.4, construya un diagrama de tendencias ¿Observa algún comportamiento o tendencia?. Los resultados se indican en la figura 1.7.

⁴ El número de datos de la muestra determina los puntos consecutivos que constituyen un comportamiento



1.2.2.2 Gráfica de control. Se utiliza para determinar si la viabilidad del proceso se debe a causas aleatorias o no, y si el proceso se encuentra bajo control estadístico. Consiste en una línea central (LC) y un par de límites de control estadísticamente determinados, un límite de control superior (LCS) y otro de control inferior (LCI), los cuales representan los valores de tolerancia permitidos a la variable o atributo analizado, tabla 1.5.

De manera general estos valores se calculan así:

$$LCS = \mu + k\sigma \quad \text{límite de control superior}$$

$$LC = \mu \quad \text{valor central}$$

$$LCI = \mu - k\sigma \quad \text{límite de control inferior}$$

Siendo μ la media y σ la desviación estándar, el valor generalmente es de 3, lo que la identifica como la gráfica de control de 3σ . Las gráficas de control se clasifican en dos categorías generales: gráfica de control de variables y gráficas de control de atributos.

Tabla 1.4 Valores resultantes de la inspección de un producto durante 4 semanas

Variable: número de defectos			
Período (tiempo)	Frecuencia	Período (tiempo)	Frecuencia
1	3	11	3
2	4	12	2
3	3	13	8
4	5	14	7
5	4	15	4
6	5	16	2
7	2	17	5
8	4	18	4
9	3	19	2
10	2	20	3

Figura 1.7 Ejemplo de diagrama de tendencia. Comportamiento de los defectos encontrados durante la revisión diaria de un lote de piezas de 200 unidades. La media se ubica en 5. Del análisis de la gráfica no se detecta ningún patrón o tendencia.

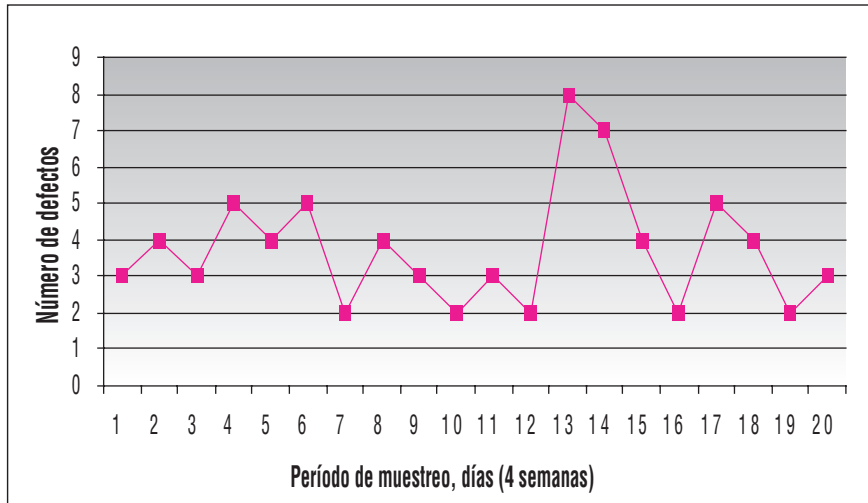


Tabla 1.5 Tipos de Gráficas de Control

VALOR CARACTERISTICO	GRAFICO DE CONTROL
Variable (Valor continuo)	Gráfica media \bar{X} Gráfica de rango R Gráfica de desviaciones estándar S
Atributo (Valor discreto)	Gráfico np (número de unidades defectuosas) Gráfico p (fracción de unidades defectuosas) Gráfico c (unidades defectuosas) Gráfico u (número de defectos por unidad)

Fuente: D'ALESSIO IPINZA F. Administración y Dirección de la Producción. Enfoque Estratégico y de Calidad. Prentice Hall. 2002. 420 p

1.2.2.2.1 Gráficas de control de variables. Si las características de calidad para analizar son medidas y expresadas como una variable continua⁵ como longitud, peso, concentración, dimensiones, se utiliza una gráfica de control de variables, tabla 1.6; esto proporciona mayor información acerca

⁵ Características que se pueden expresar en función de las 7 unidades básicas: longitud, tiempo, corriente eléctrica, temperatura, sustancia, intensidad; mediante unidades derivadas: potencia, velocidad, fuerza, energía, densidad y presión.



del proceso. Generalmente se utiliza un diagrama de media \bar{X} y un diagrama de rango R . El diagrama \bar{X} mostrará el valor promedio de la variable que se esta midiendo y el de rango R la variación entre los elementos dentro de las muestras. Este monitoreo dual controla tanto valores promedios como variaciones partiendo de sus respectivas medias.

□ Diagramas de promedio o de media

Los diagramas de promedio o de media se emplean cuando las variables del proceso se registran durante períodos largos y se elabora la gráfica de cada variable de forma individual. El valor de la media \bar{X} no solo especifica el artículo como conforme o no conforme, sino a través de la cuantificación de la variable de calidad, valora el grado de no conformidad del artículo respecto de lo especificado. La media y la variación estándar se calcula como:

$$\bar{X}_j = (1/n) \sum_{j=1}^n x_j \quad \bar{\bar{X}}_j = (1/m) \sum_{j=1}^m \bar{X}_j \quad \sigma_w = \sigma / \sqrt{n}$$

Tabla 1.6 Límites de control estadístico para gráficas de control de variables⁶

TIPOS DE GRAFICAS DE CONTROL	Límites superior de control (LCS) Limite central (LC) Límites inferior de control (LCI)
Valor continuo - promedio / rango $\bar{X} - R$	LCS = $\bar{\bar{X}} + A_2 \bar{R}$ LC = $\bar{\bar{X}}$ LCI = $\bar{\bar{X}} - A_2 \bar{R}$
Valor continuo-rango/desviación estándar $R - S$	LCS = $D_4 \bar{R} \leftrightarrow B_3 \bar{S}$ LC = $\bar{\bar{R}} + \bar{\bar{S}}$ LCI = $D_3 \bar{R} \leftrightarrow B_4 \bar{S}$
Valor continuo - promedio / desviación estándar $\bar{X} - S$	LCS = $\bar{\bar{X}} \leftrightarrow A_3 \bar{S}$ LC = $\bar{\bar{X}}$ LCI = $\bar{\bar{X}} - A_3 \bar{S}$

Fuente: D'ALESSIO IPINZA F. Administración y Dirección de la Producción. Enfoque Estratégico y de Calidad. Prentice Hall. 2002. 520 p



□ Diagrama de Rangos

Los gráficos de rango se utilizan para controlar la variabilidad del proceso cuando el tamaño de la muestra es pequeño; generalmente por debajo de 8. Si el tamaño de la muestra es grande se emplea la desviación estándar en lugar del rango R. los parámetros para la construcción de la gráfica se obtienen de:

$$R_i = x_{\max} - x_{\min} \quad i (1..n) - \text{tamaño de la muestra}$$

$$\bar{R} = (1/m) \sum_{i=1}^m R_i \quad ; \quad \bar{S} = (1/m) \sum_{i=1}^m S_i \quad \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X}) / (n - 1)$$

Donde:

R: rango de la muestra	\bar{R} : media del rango de una muestra
S: desviación estándar	\bar{X} : media de la muestra
\bar{S} : media de la desviación estándar	$\bar{\bar{X}}$: promedio de promedios de muestras
n : tamaño de la muestra	m : número de muestras (subgrupos)
σ : Variación estándar	x_j : Variables de proceso

Tabla 1.7 Coeficientes para determinar los límites de control estadístico de la tabla 1.6. (n es el tamaño de la muestra)

n	A ₂	A ₃	D ₃	D ₄	B ₃	B ₄	n	A ₂	A ₃	D ₃	D ₄	B ₃	B ₄
2	1.880	2.659	0.000	3.267	0.000	3.267	14	0.235	0.817	0.328	1.672	0.406	1.594
3	1.023	1.954	0.000	2.574	0.000	2.568	15	0.223	0.789	0.347	1.653	0.428	1.572
4	0.739	1.628	0.000	2.282	0.000	2.266	16	0.212	0.763	0.363	1.637	0.448	1.52
5	0.577	1.427	0.000	2.115	0.000	2.089	17	0.203	0.739	0.378	1.622	0.466	1.534
6	0.483	1.287	0.000	2.004	0.030	1.970	18	0.194	0.718	0.391	1.608	0.482	1.518
7	0.419	1.182	0.076	1.924	0.118	1.882	19	0.187	0.698	0.403	1.597	0.497	1.503
8	0.373	1.099	0.136	1.864	0.165	1.815	20	0.180	0.680	0.415	1.585	0.510	1.490
9	0.337	1.032	0.184	1.816	0.239	1.761	21	0.173	0.663	0.425	1.575	0.523	1.477
10	0.308	0.975	0.223	1.777	0.284	1.716	22	0.167	0.647	0.434	1.566	0.534	1.466
11	0.285	0.927	0.256	1.744	0.321	1.679	23	0.162	0.633	0.443	1.557	0.545	1.455
12	0.266	0.866	0.283	1.717	0.354	1.646	24	0.157	0.619	0.451	1.548	0.555	1.445
13	0.249	0.850	0.307	1.693	0.382	1.618	25	0.153	0.606	0.459	1.541	0.565	1.435

Fuente: D'ALESSIO IP/INZA F. Administración y Dirección de la Producción. Enfoque Estratégico y de Calidad. Prentice Hall. 2002. 520 p

Ejemplo 1.2: La empresa TQM quiere verificar si el proceso que utiliza para fabricar agujeros para alojar rodamientos en piezas como la indicada en la figura 1.8, con una especificación en planos de 1.6233 ± 0.0010 pulgadas, y una tolerancia de 0.002 pulgadas, se encuentra bajo control estadístico.

Para comprobarlo se elabora una gráfica de promedio y rango. Se seleccionan 50 piezas fabricadas consecutivamente en un período corto y se forman 10 subgrupos de 5 piezas cada uno. Los diámetros de los agujeros en cada pieza se miden y registran en la figura 1.9. Para cada subgrupo se calcula la media \bar{X} y el rango R y se construye el diagrama $\bar{X} - R$, con los promedios de cada subgrupo y el promedio de promedios $\bar{\bar{X}} - \bar{R}$ se traza la gráfica $\bar{\bar{X}} - \bar{R}$. Se calculan luego los límites superior e inferior utilizando las expresiones:

Para el diagrama de promedio,

$$LCS = \bar{\bar{X}} + A_2 \bar{R} = 1.62332 + 0.577 \times 0.00056 = 1.32364 \text{ pulgadas}$$

$$LCI = \bar{\bar{X}} - A_2 \bar{R} = 1.62332 - 0.577 \times 0.00056 = 1.62300 \text{ pulgadas}$$

Para el diagrama de rango,

$$LCS = D_4 \bar{R} = 2.115 \times 0.00056 = 0.0011 \text{ pulgadas}$$

$$LCI = D_3 \bar{R} = 0 \times 0.00056 = 0 \text{ pulgadas}$$

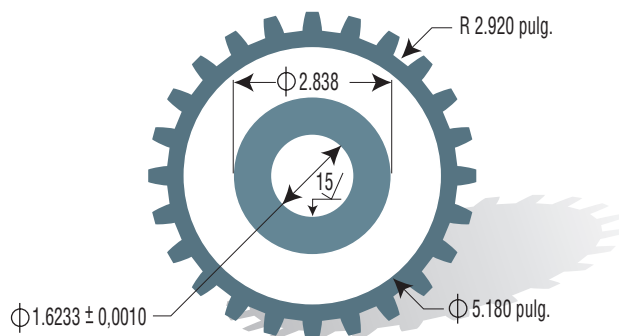
Siendo:

$$\bar{\bar{X}} = 1.62332 \text{ y } \bar{R} = 0.00056 \quad D_4 = 2.115 \text{ y } D_3 = 0 \text{ Tabla 1.7}$$

Determinadas todas las variables se construye el diagrama $\bar{\bar{X}} - \bar{R}$, figura 1.9

Como las variaciones no superan los límites establecidos, se concluye que el proceso está bajo control estadístico.

Figura 1.8 Pieza a mecanizar para el ejemplo 1.2



Después de verificar que el proceso se encuentra bajo control estadístico, se determina si cumple con los requerimientos que garanticen las tolerancias especificadas. Con este fin, se calcula la capacidad del proceso, la cual se define como 6 desviaciones estándar de la variación del subgrupo (6S). La variación estándar se estima a partir de del diagrama de control. es decir:

$$S = \frac{\bar{R}}{d_2} = \frac{0.0002407}{2.326} = 0.0002407$$

Donde :

R : promedio del rango del grupo

d_2 : constante. Se obtiene de la tabla 1.8

La capacidad del proceso es:

$$c_p = 6 \times 0.0002407 = 0.0014442$$

La capacidad del proceso y la tolerancia se combinan para formar el índice de capacidad, definido como:

$$C_p = \frac{\text{Tolerancia}}{6S}$$

Tabla 1.8 Factores para construir cartas de control de variables

Observaciones	FACTORES PARA LÍNEA CENTRAL	
	d_2	$1/d_2$
2	1,128	0,8865
3	1,693	0,5907
4	2,059	0,4857
5	2,326	0,4299
6	2,534	0,3946
7	2,704	0,3698
8	2,847	0,3512
9	2,97	0,3367
10	3,078	0,3249
11	3,173	0,3152
12	3,258	0,3069
13	3,336	0,2998
14	3,407	0,2935
15	3,472	0,288
16	3,532	0,2831
17	3,588	0,2787
18	3,64	0,2747
19	3,689	0,2711
20	3,735	0,2677
21	3,778	0,2647
22	3,819	0,2618
23	3,858	0,2592
24	3,895	0,2567
25	3,931	0,254

Fuente: NANUA Singh. System Approach to Computer Integrated Desing and Manufacturing. John Wiley Sons.1996. 643p



Mediante el índice de tolerancia se puede medir la calidad siempre y cuando el proceso esté centrado, figura 1.10. Cuanto mayor sea el índice de capacidad mayor será la garantía de que el producto fabricado cumple con las especificaciones.

1.2.2.2 Gráficos de control de atributos. Cuando la calidad de un producto se juzga como aceptado o no aceptado de acuerdo a las especificaciones, se habla de atributos. Si una característica de calidad no puede medirse sobre una escala continua se dice que es un atributo, son ejemplos de atributos las grietas, la aparición de defectos, componentes perdidos, y todos aquellos defectos visuales que conducen a un rechazo de la pieza. Algunas gráficas de control de atributos se indican en las tablas 1.9 y 1.10.

□ Gráfica “p”

Las gráficas “p” se utilizan para controlar las no conformidades de productos y el desempeño, en cuanto a calidad, de una unidad o departamento. En cuanto al control de la proporción de la no conformidad se refiere a: una sola característica de calidad, un grupo de características de calidad, solo una parte de ellas, un producto completo, o una cantidad determinada de productos. Cuando se refiere al control del desempeño, está relacionado con un operario, un centro laboral, un departamento, un turno, una planta o una empresa. El tamaño del lote analizado no necesariamente es constante. La media y la desviación estándar se calculan con base en muestras de tamaño “n” a partir de:

$$P = (1/m) \sum_{i=1}^m ((1/n) \sum_{j=1}^n x_{ij}) \quad \mu = \bar{p} \quad \sigma_w^2 = p(1-p)/n$$

□ Gráfica “np”

Es similar a la gráfica “p”, sin embargo, su uso es diferente. En este caso, se determina en cada muestra el número de artículos defectuosos. Con este diagrama, se escala la gráfica “p” en cada una de las muestras. La variable aleatoria considerada, representa la conformidad del producto analizado con respecto a las especificaciones. El tamaño del lote debe ser constante. Los valores de la media y la desviación estándar son:

$$\mu_w = n\bar{p}$$

$$\sigma_w^2 = n\bar{p}(1-\bar{p})$$





1.2.2.2.3 Gráficas de control por número de no conformidades.

Mientras que la gráfica “p” controla la proporción de no conformidades de un producto, con la gráfica de no conformidades se controla el número de anomalías presentes en el producto. Se disponen de dos tipos de gráficas: gráfica “c”, del número de no conformidades, y la gráfica “u”, del número de no conformidades por unidad.

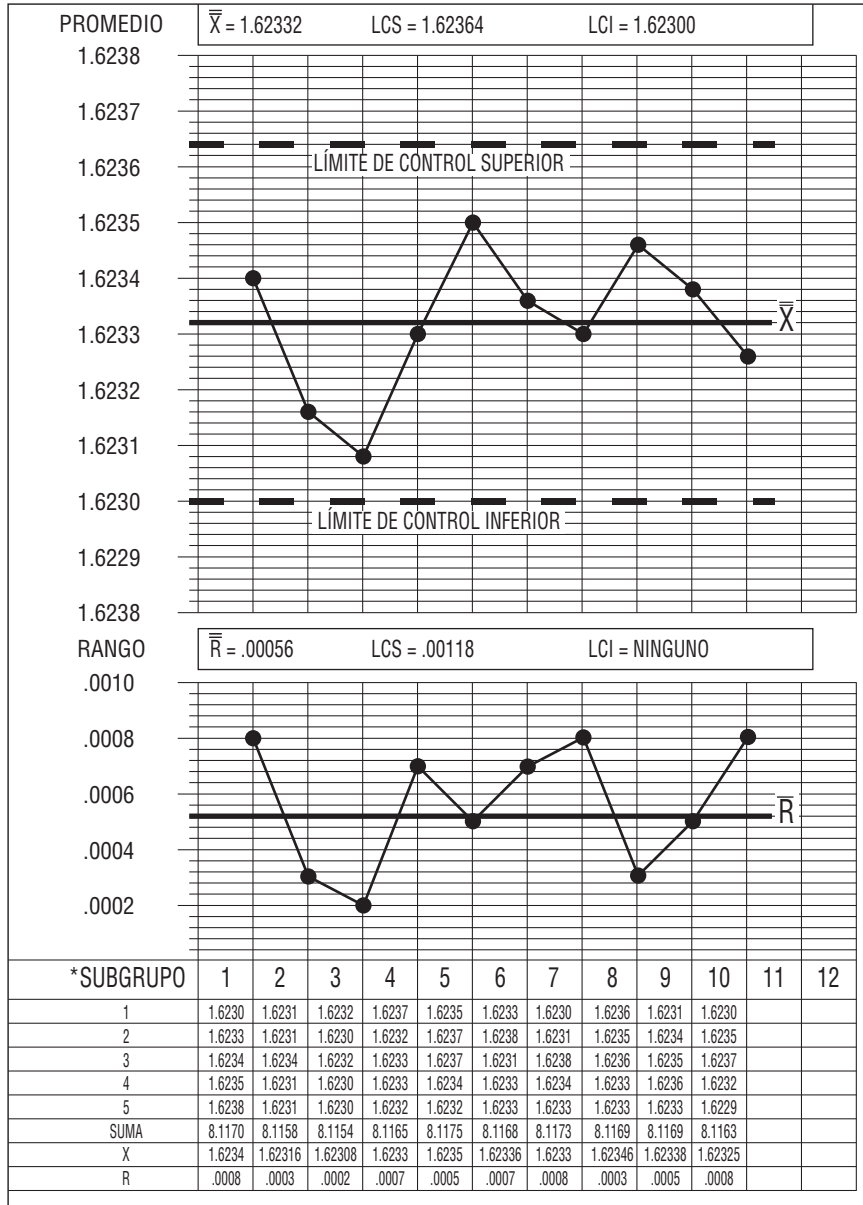
□ Gráfica “c”

Sirve para controlar una o un grupo de características de calidad, una pieza, un producto en su totalidad, o varios productos. Además para controlar el desempeño de un operario, un centro laboral, un departamento, un turno, una planta, o una compañía. El tamaño del lote debe ser constante. Para este caso la media y la desviación estándar se calculan de:

$$\mu_w = \sigma_w^2 = \bar{c} \quad \bar{c} = (1/m) \sum_{i=1}^m x_n$$

Donde “m” es el número de defectos de unidades de inspección usadas para estimar “c”, y x_n el número de no conformidades de la unidad i.

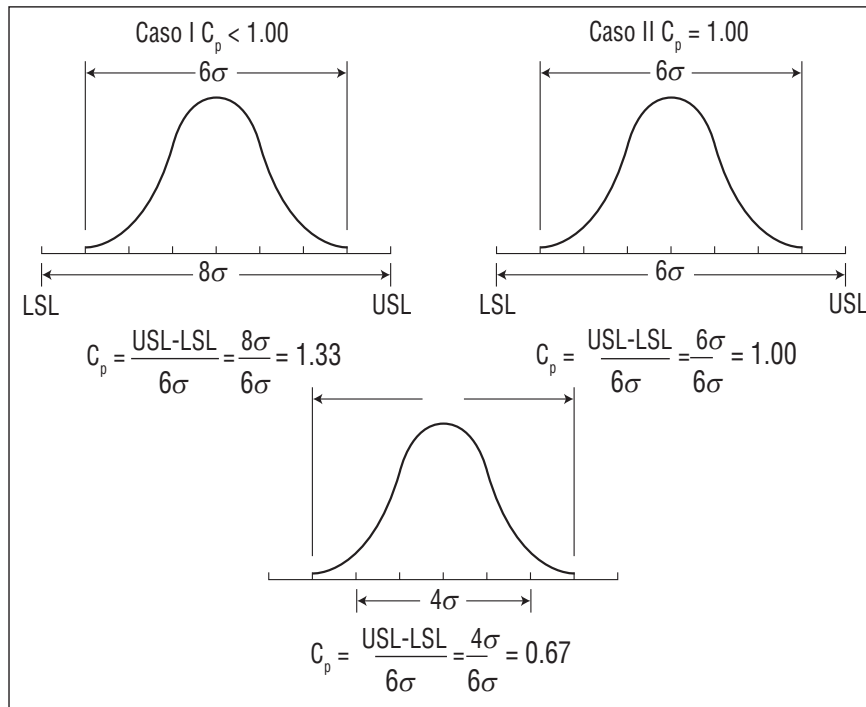
Figura 1.9 Diagrama de promedio y de rango para el ejemplo 1.2



Fuente: MARK Curtis. Planeación de Procesos. Colección Microempresa. Linusa Editores.1996. 643p



Figura 1.10 Tres casos de índices de capacidad: $C_p > 1$, el proceso asegura que el producto está bajo especificaciones; $C_p < 1$, el producto es aceptable; $C_p = 1$, no hay garantía de que los productos están dentro de las especificaciones



□ Gráfica “u”

Se utiliza en aquellos casos donde el tamaño del subgrupo analizado está conformado por un elemento que puede ser un aeroplano, 100 metros cuadrados de tela, etc..El tamaño de la unidad es cualquiera que satisfaga un objetivo determinado. El tamaño del lote debe ser constante. La gráfica “u” se obtiene de la misma manera que la gráfica “c”. La media y la desviación estándar se obtienen así:

$$\mu_w = \bar{u} \quad \sigma_w^2 = \bar{u} / n$$

Donde n es el número de unidades de inspección.



Tabla 1.9 Tipos de gráficas de control de atributos

TIPOS DE GRAFICAS DE CONTROL	Límites superior de control (LCS) Límite central (LC) Límites inferior de control (LCI)
Valor discreto - fracción de unidades defectuosas np (n es constante)	$LCS = n\bar{p} + 3\sqrt{\frac{p(1-\bar{p})}{n}}$ $LC = \bar{p}$ $LCI = \bar{p} - 3\sqrt{\frac{p(1-\bar{p})}{n}}$
Valor discreto - fracción de unidades defectuosas p (n puede variar)	$LCS = \bar{p} + 3\sqrt{\frac{p(1-\bar{p})}{n}}$ $LC = \bar{p}$ $LCI = \bar{p} - 3\sqrt{\frac{p(1-\bar{p})}{n}}$
Valor discreto - fracción de unidades defectuosas c (n es constante)	$LCS = \bar{c} + 3\sqrt{\bar{c}}$ $LC = \bar{c}$ $LCI = \bar{c} - 3\sqrt{\bar{c}}$
Valor discreto - fracción de unidades defectuosas u (n puede variar)	$LCS = \bar{u} + 3\sqrt{\frac{\bar{u}}{n}}$ $LC = \bar{u}$ $LCI = \bar{u} - 3\sqrt{\frac{\bar{u}}{n}}$

Fuente: D'ALESSIO IPINZA F. Administración y Dirección de la Producción. Enfoque Estratégico y de Calidad. Prentice Hall. 2002. 520 p

**Tabla 1.10 Límites de control estadístico para gráficas de control de atributos**

Límites	p Fracción defectuosa	np Número defectos	c Defectos por unidad homogénea	u Defectos en muestra definida
LM	\bar{p}	$n\bar{p}$	\bar{c}	\bar{u}
LSC	$\bar{p} + 3\sqrt{\frac{\bar{p}(1-\bar{p})}{n}}$	$n\bar{p} + 3\sqrt{np(1-\bar{p})}$	$\bar{c} + 3\sqrt{\bar{c}}$	$\bar{u} + 3\sqrt{\frac{\bar{u}}{n}}$
LIC	$\bar{p} - 3\sqrt{\frac{\bar{p}(1-\bar{p})}{n}}$	$n\bar{p} - 3\sqrt{np(1-\bar{p})}$	$\bar{c} - 3\sqrt{\bar{c}}$	$\bar{u} - 3\sqrt{\frac{\bar{u}}{n}}$
Distribución	Binominal (si n varía usar \bar{n})	Binominal (n constante)	Poisson (n constante)	Poisson (si n varía usar \bar{n})

Fuente: D'ALESSIO IPINZA F. Administración y Dirección de la Producción. Enfoque Estratégico y de Calidad. Prentice Hall. 2002. 520 p

1.2.2.3. Diagrama de Pareto. Utiliza un gráfico que proporciona una ilustración visual acerca de la frecuencia de ocurrencia de determinados fenómenos que afectan el proceso de fabricación (defectos, rechazos, devoluciones, accidentes) o causas (experiencia del operario, tipo de materia prima, clase de máquina herramienta, condiciones de operación) a partir de las cuales pueden determinarse acciones para mejorar o innovar el proceso de fabricación.

Para la construcción del diagrama de Pareto se sigue el procedimiento siguiente:

- Definir las variables que se desea investigar, es decir piezas defectuosas, tipos de defectos, etc.
- Determinar los datos que se van a necesitar y la manera de clasificarlos. Ejemplo: tipo de defecto, localización, proceso, máquina herramienta, etc.
- Establecer el método de recolección de datos y el período de duración de la recolección. Diseñar el formato adecuado.
- Diseñar una tabla de conteo con espacio suficiente para totalizar los datos obtenidos como en la tabla 1.1.
- Elaborar tabla de datos a partir de la cual se construirá el diagrama de Pareto, con la lista de variables, los totales individuales, los totales acu-



mulados, la composición porcentual y los porcentajes acumulados, tabla 1.3.

- Con los datos recolectados se construye el diagrama de Pareto, colocando las variables en el eje horizontal, el cual se divide en intervalos iguales de acuerdo al número de variables establecidas. En el eje vertical derecho se mostrará los totales y en el izquierdo los porcentajes. Se elabora el diagrama de barras y se muestran los valores acumulados en la parte superior, al lado derecho de los intervalos de cada variable, y se unen los puntos mediante una línea continua, figura 1.11.
- Por último se escribe la información necesaria para identificar el diagrama (título, unidades, valores significativos) o acerca de los datos (periodos, variable, tipo de producto, número total de datos, etc.).

El procedimiento descrito se ilustra mediante el ejemplo siguiente:

Ejemplo 1.3: La empresa TQM fabrica pernos de acero inoxidable de 25 mm de diámetro de la cabeza y 50 mm de longitud. Debido a los rechazos que en el último mes ha tenido este producto, se decide mostrar en un diagrama de Pareto los defectos más frecuentes que se generan durante el proceso de fabricación.

- Variable para controlar: Defectos.
- Información requerida: Frecuencia o número de observaciones de cada defecto de fabricación.
- Método de recolección de datos: Consulta de reportes acerca del desarrollo del proceso productivo, los problemas presentados durante la producción de piezas y de imperfecciones presentes en el producto final.

Elaboración de tabla de conteo: la tabla 1.11 resume el número de observaciones de los defectos más relevantes presentes en los tornillos.

- Programación de tiempo extra.
- Inspección del 100% del producto.
- Asignar un inspector adicional para supervisar el proceso de fabricación.
- Utilizar materiales de mejor calidad.

Mientras estas acciones operan, se debe continuar con el proceso de estudio y análisis de los problemas o anomalías del proceso de fabricación del producto, o de las causas que generan las diferentes no conformidades. Se sugiere consultar con el cliente, interno o externo, las medidas temporales que se piense adoptar y con sus ideas y observaciones encontrar soluciones que generen confianza en el cliente.

1.2.4 Detección de las causas más importantes. Es indispensable determinar las causas y los efectos que originaron las diferentes anomalías. Con este fin se utiliza el diagrama Causa Efecto y la técnica de Votación Razonada.

1.2.4.1 Diagrama causa efecto. El diagrama causa efecto muestra la relación entre las variables o atributos y sus factores o causas. Cataloga las posibles fuentes de los problemas relativos a defectos de calidad, propiedades del producto, operaciones de fabricación, entre otras. Igualmente, el diagrama permite reconocer interrelaciones entre causas y atributos, y determinar donde recolectar datos relacionados con el origen de los problemas encontrados. Normalmente, cada uno de los pocos vitales identificados en el análisis de Pareto, son un aspecto para analizar, investigando cuáles son las posibles causas que lo originan.

El procedimiento para construir el diagrama es:

- Se describe el atributo o variable de calidad que se va a analizar.
- La caracterización de la calidad seleccionada se coloca a la derecha del diagrama y al lado izquierdo se ubican los factores para discusión y consulta entre las personas involucradas en el proceso productivo y evitar, de esta manera, omisiones que afecten los resultados de los análisis.
- Las características de calidad deben ser lo más concretas y reales posibles. Hay que evitar los términos abstractos.



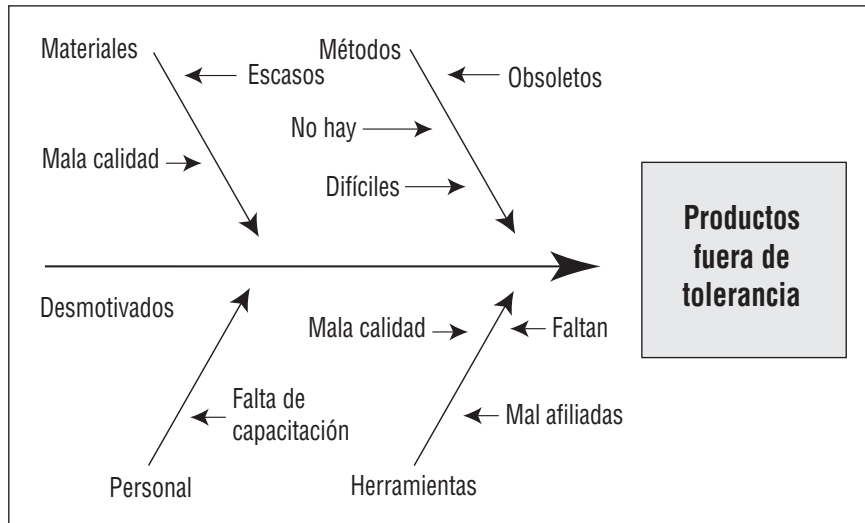
- Se describen las causas primarias o ramas principales.
- Se establecen las ramas o causas secundarias, las cuales se derivan de las ramas principales y así sucesivamente.
- Los factores y características deben ser medibles. Además, de poder modificarse y subdividirse hasta el nivel en que sea posible realizar acciones sobre ellos con el fin de lograr resultados significativos.
- Asignar valores a factores de manera objetiva, con base en datos.
- Se ordenan las causas por afinidad y se construye el diagrama causa-efecto, figura 1.12.
- Se registra cualquier información que lo identifique, por ejemplo: título, nombre de atributo o variable, nombre del producto, etc.

1.2.4.2 Votación Razonada. Técnica grupal utilizada para la toma de decisiones, permite aprovechar la experiencia y el conocimiento que sobre el tema analizado tienen las personas participantes. Las decisiones se toman por votación, quienes conocen el tema y han participado desde el comienzo del estudio. Las personas que participan en una votación razonada deben:

- Conocer el tema que se estudia.
- Haber participado en la mayoría de las reuniones donde se estudió y analizó el tema.
- Fundamentar las ideas consideradas importantes con el fin de ayudar a sus compañeros a conocer mejor las ideas planteadas y facilitar la toma de decisiones al momento de votar.
- Una vez el grupo tome la decisión, todos los integrantes del grupo deben apoyarla.

Basados en estos principios y mediante un análisis y valoración, o una votación razonada, se determinan a través de técnicas, las causas más relevantes. Antes de votar se sugiere sustentar las causas que se consideren importantes por parte de los integrantes del equipo, con hechos que ayuden a clarificarlas y fundamentarlas con el fin de obtener elementos de juicio al momento de votar. Para conseguir un mejor resultado:

Figura 1.12 Ejemplo de diagrama causa-efecto para determinar las posibles causas de las no conformidades presentadas durante el proceso de fabricación de un producto metalmeccánico.



- Realice un barrido al diagrama Causa Efecto para eliminar las causas que, en opinión del grupo de trabajo, no generen ningún efecto.
- Numerar las causas en forma progresiva.
- Mediante votación razonada, seleccionar el 20% de las causas que, según el criterio del grupo conocedor del problema que se estudia, son las más importantes.
- Comprobar que las causas seleccionadas son las que generaron los problemas.

Para determinar la importancia de cada causa, se debe fundamentar con hechos reales para establecer el origen de la falla o anomalía, tabla 1.12. Si se encuentran cinco hechos⁷ que validen la causa, se considera real e importante; si se obtienen sólo 3, la causa es real pero su relevancia dudosa; por debajo de tres se considera irrelevante. En la columna de resultados las causas se clasifican como reales y no reales, importantes o poco importantes, en cuyo caso se descartan.

⁷ SOSA PULIDO Demetrio. Conceptos y herramientas para la mejora continua. Limusa. Noriega. Editores. Mexico. 2002. 72 p



1.2.5 Propuestas de alternativas. Después de determinar las causas que originaron los problemas se procede a la etapa de proponer soluciones. Aquí pueden participar las mismas personas que integraron el equipo de votación razonada o personas nuevas que conozcan del tema de estudio. Este grupo generará una serie de posibles soluciones, de las cuales se seleccionarán las que parezcan lógicas y viables, tabla 1.13. Las alternativas relacionadas se valoran teniendo en cuenta los factores siguientes:

- Valoración Técnica: Establece si es factible llevar a cabo la solución elegida por tecnología, capacidades, espacio, instalaciones, etc., tabla 1.13.
- Valoración Económica: determina la viabilidad de la solución, valora la relación costo beneficio.
- Valoración Financiera: Define el presupuesto que se necesita para ejecutar la solución.
- Valoración Humana: Asegura que el personal disponible está comprometido con la solución.
- Valoración Ecológica: La solución no solo no debe afectar el medio ambiente, sino, que se debe buscar en lo posible la manera que lo beneficie.

La información obtenida se resume en la tabla 1.14

1.2.6 Comprobación de resultados. Una vez implantadas las soluciones, se debe estar en capacidad de medir los resultados obtenidos mediante registros, datos de la situación anterior y la actual, es decir después de aplicar las soluciones propuestas. Para la recolección de la información se emplean gráficas, histogramas, fotografías, etc.. Cuando se comprueba la validez de la solución, se procede a documentar los cambios surgidos de la implementación de las soluciones, en procedimientos, métodos de trabajo, normas, instructivos, reglamentos, entre otros, en cualquier documento que considere los cambios realizados y que rija el quehacer y comportamiento del personal y del proceso productivo.



Tabla 1.12 Modelo para comprobar la relevancia de una causa

Causa	Método de comprobación	Quién lo comprueba	Como lo comprueba	Cuando lo hace	Resultados
1					
2					
3					
4					
5					

Tabla 1.13 Modelo para realizar la valorización técnica

Soluciones posibles	Cómo comprobar	Quién lo hará	Que se requiere	Cuando lo hará	Resultados
1					
2					
3					
4					
5					

Tabla 1.14 Modelo para realizar la valorización de soluciones

Comprobación	Técnica	Económica	Financiera	Humana	Ecológica	Resultados

Este tipo de valoraciones aseguran que las soluciones propuestas resuelvan o reduzcan el problema. Su programación y tiempo de realización se controla mediante una gráfica de Gantt, o si es complejo, mediante el método de la ruta crítica.



2. Secuenciación y programación de ciclos de fabricación

2.1 Introducción

El proceso de fabricación es un procedimiento mediante el cual se elabora un producto a partir de una materia prima; tiene lugar después de que el proceso de diseño se ha completado. A partir de la información consignada en los planos que especifican las características del producto diseñado, se crea el plan de fabricación el cual comprende la planeación, secuenciación y programación de los ciclos de fabricación.

La función del proceso de planeación es determinar el procedimiento para elaborar el producto para que cumpla con los requerimientos del cliente y su costo sea el más bajo posible. La importancia de una buena planeación del proceso de fabricación de una pieza radica en que los minutos que se utilicen para corregir errores durante el proceso de planeación, puedan generar aho-

rros considerables para invertir en la compra o construcción de nuevas herramientas o dispositivos. El proceso de planeación desarrollado, debe permitir la fabricación de un producto de buena calidad al menor costo. Los objetivos del proceso de planeación se resumen como sigue:

- Determinar y seleccionar el equipo necesario para fabricar la pieza.
- Establecer el orden o secuencia de ejecución de actividades necesarias para la fabricación de la pieza en términos de operación, ruta, detalles de fabricación, y esquemas de proceso.
- Especificar las tolerancias de fabricación sobre el material a trabajar y sobre superficies auxiliares.
- Especificar los parámetros del proceso para las operaciones de fabricación seleccionadas.
- Proveer la documentación necesaria para que sea utilizada por el personal del taller.

La programación y las decisiones de piso de taller enfocadas a los procesos, se inician con la generación de una orden de trabajo de acuerdo a un plan de requerimientos de materiales MRP, y un plan de requerimientos de capacidad CRP, figura 2.1.

Por lo general, las tareas¹ se ejecutan por proceso, en algunas ocasiones por lotes, basándose en el pedido del cliente o en alguna cantidad económica. Cada tarea por realizar se libera con una orden de trabajo, la cual sigue un camino específico a través de varios centros de mecanizado. Debido a la gran variedad de procesos metalmeccánicos que se pueden realizar durante una tarea, en algunas ocasiones, esta actividad se puede realizar siguiendo diferentes caminos o rutas.

2.2 Orden de trabajo

Es un importante vehículo de comunicación que se utiliza en todo proceso de fabricación. Es una petición escrita del trabajo por realizar, que incluye materiales y costos. A partir del sistema de requerimientos de materiales (MRP), se puede determinar cuando deben liberarse las ordenes para cada número de componentes. Del sistema de requerimientos de capacidad (CRP), se puede establecer en que centro de trabajo deberá ejecutarse cada orden. Debido a

¹ Actividades que se desarrollan con el fin de producir una pieza o producto. Se definen mediante una hoja de operación y una hoja de fabricación.



que, a la orden de trabajo se le puede asignar o no un número diferente a medida que pasa por las etapas sucesivas de la producción, una orden, de una parte o pieza, puede quedar ligada a centros de trabajo específicos dentro de la fábrica.

Con esta información se elabora la planeación y/o programación y se toman decisiones, que incluyen definir en que secuencia se ejecutarán las órdenes en los centros de trabajo, asignar las ordenes a las máquinas dentro de cada centro de trabajo y tomar decisiones de control dentro del taller.

2.3 Elaboración de una orden de trabajo

Con base en la naturaleza y tipo de producto, se elabora un documento² donde se autoriza la fabricación de la pieza y al cual se anexa un croquis o plano que contiene las características del producto. Cuando se documenta el proceso, la generación de una orden de trabajo requiere un estudio más cuidadoso, figura 2.2. Las ordenes de trabajo generadas siempre quedan ligadas a la producción a través de la fecha de entrega.

La red de centros de trabajo a la cual se asigna una orden de trabajo, determina el plan de ruta de la misma. En general, los trabajadores y las máquinas son tan flexibles que es posible asignarlas y reasignarlas a muchas órdenes diferentes. En un entorno tan flexible, variable y cambiante como el descrito, los programas para cada centro de trabajo deben ser específicos y detallados para poner orden en una situación potencialmente desordenada.

Para elaborar y programar una orden de trabajo para la fabricación de una pieza metalmecánica, se sigue el siguiente procedimiento:

- Análisis de requerimientos de partes.
- Selección de la materia prima.
- Determinación de las operaciones de fabricación y su secuencia.
- Selección de las máquinas herramientas.
- Selección de las herramientas, dispositivos de sujeción y equipo de inspección.
- Determinación de las condiciones de maquinado (velocidad de corte, avance y profundidad de corte) y tiempos de fabricación (tiempo de mecanizado, tiempo muerto).

² A este documento se le conoce generalmente como orden de trabajo.



Figura 2.1 Secuencia de programación y decisiones de piso de taller en una empresa metalmeccánica.

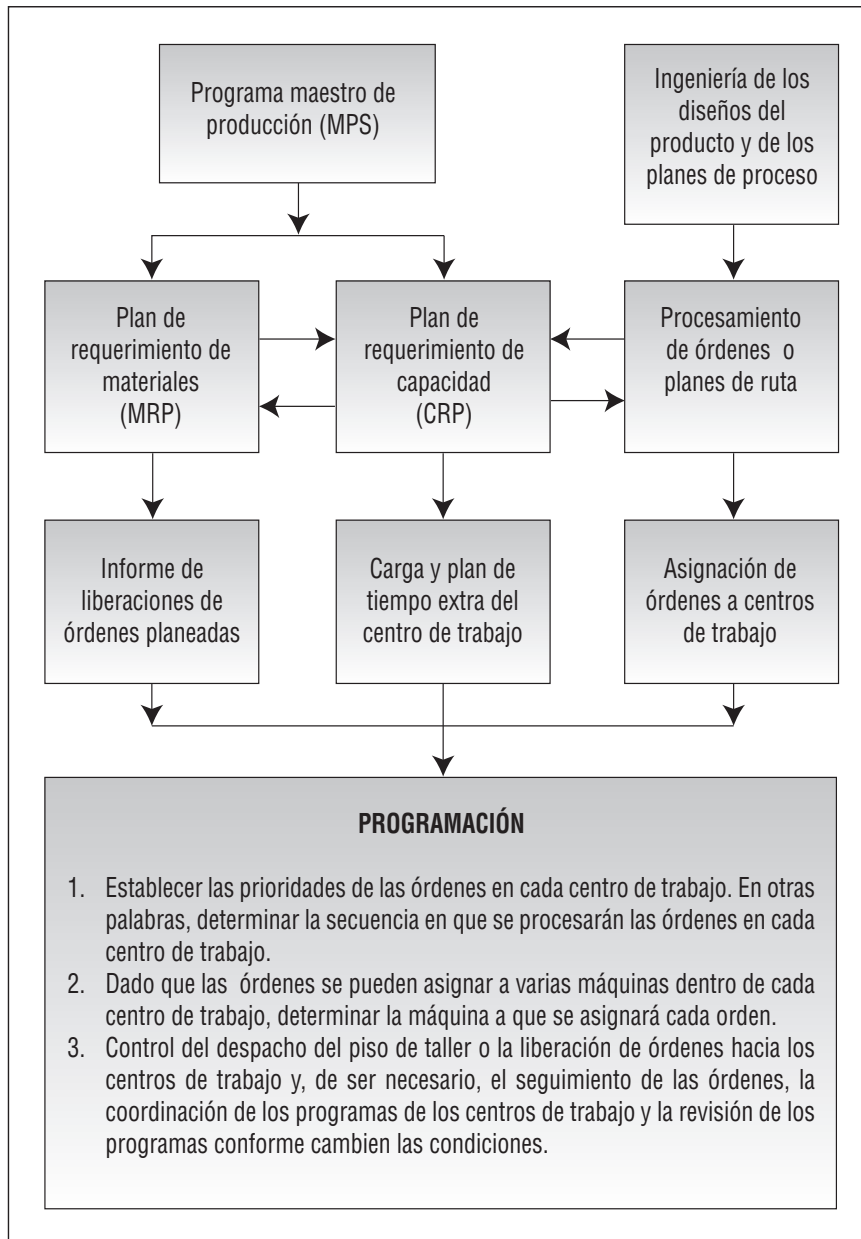
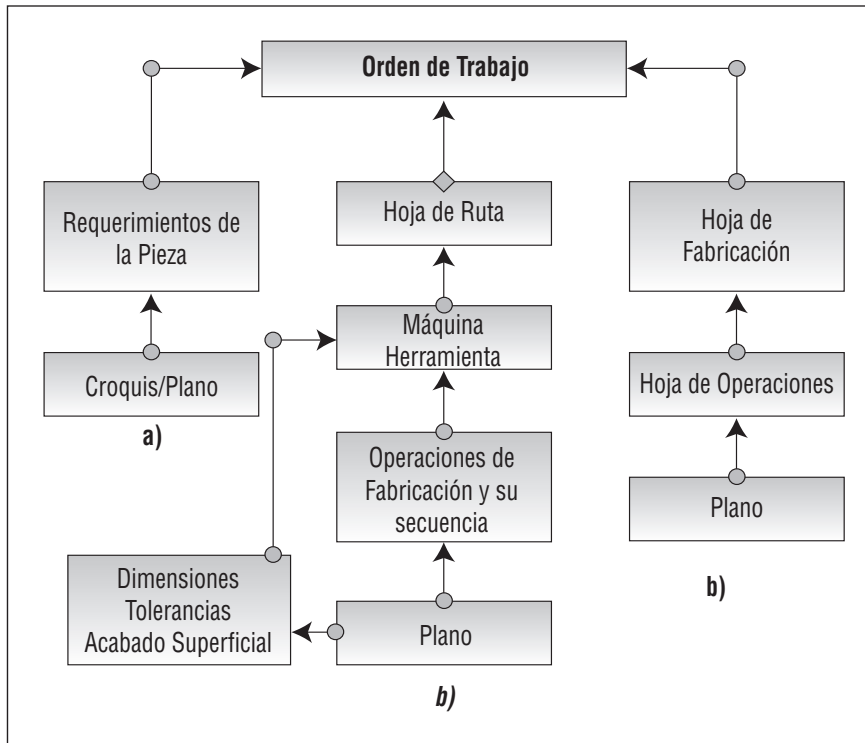




Figura 2.2 Procedimiento para la elaboración y programación de un orden de trabajo para un proceso metalmeccánico. a) Método tradicional b) Pasos cuando se documenta el proceso.



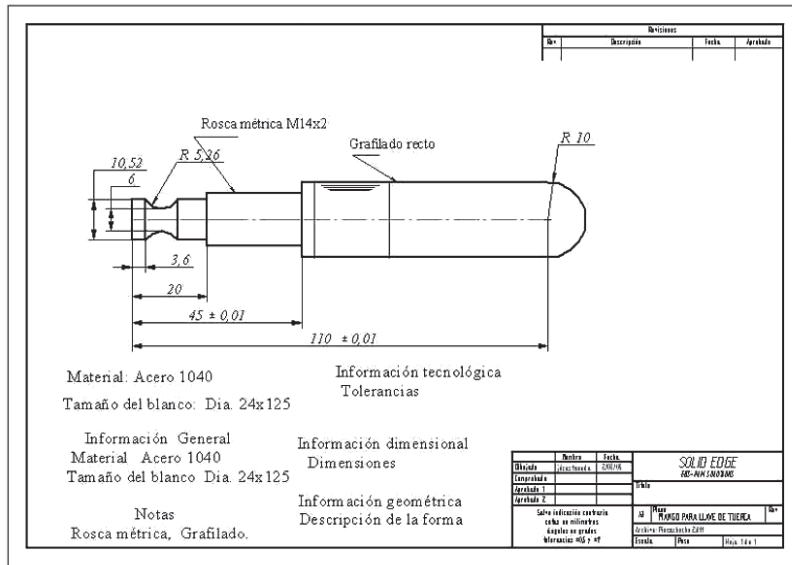
2.4 Análisis de las características de la pieza

El propósito principal de éste criterio es determinar la base de que dispone el programador o planeador para traducir las características de la pieza en detalles de proceso de fabricación. A nivel de diseño de ingeniería, las características de las piezas pueden definirse como formas de la pieza, dimensiones y especificaciones de tolerancia. Estas en general establecen los requerimientos de procesamiento. El análisis de las características de la pieza acabada es el primer paso en el proceso de planeación o programación.

En un sistema de manufactura convencional, el planeador o programador del proceso estudia el plano de la pieza para establecer el plan que se seguirá para su fabricación basado en las características dimensionales, geométricas y tecnológicas establecidas por las especificaciones de la pieza y los recursos de manufactura disponibles en el taller, figura 2.3.



Figura 2.3 Ejemplo de plano de una pieza donde se indica la información general o global, dimensional, geométrica y tecnológica.



Por lo anterior, el plano de la pieza se considera la comunicación entre el diseño y las funciones de planeación, mientras el plan de operaciones forma el eslabón entre la planeación y las funciones de manufactura (proceso de fabricación). El plano, los recursos de manufactura (máquinas y herramientas) y el plan de operaciones, implican habilidades cognitivas para su comprensión, elaboración y desarrollo. En general, el proceso de planeación y programación del proceso productivo involucra los siguientes elementos:

- ❑ **Especificaciones de diseño:** se refiere a la representación y características que la pieza para fabricar debe poseer, es el eslabón que conecta el diseño y la función de planeación.
- ❑ **Recursos para la fabricación:** la preparación del plan de proceso siempre está regida por la disponibilidad de recursos físicos y humanos. La información acerca de estos recursos debe estar disponible para generar planes realistas del proceso.
- ❑ **Plan de operaciones:** se refiere a la designación clara y detallada de las actividades que se deben realizar para la fabricación de la pieza o producto.



2.4.1 Planos. El plano es la representación de una pieza a partir de la cual un operario puede producirla. El plano debe ser un conjunto completo de instrucciones, expresadas de tal forma que no sea necesario proporcionar información adicional a la persona o personas que fabrican el producto. En consecuencia, el plano posee las proyecciones necesarias para explicar la forma, dimensiones y especificaciones, el material, para que el trabajador pueda fabricarla. Otra información que se puede encontrar son las notas de dibujo, las cuales se emplean para simplificar o complementar la información proporcionada por el acotado; es decir indican información de manera condensada y sistemática.

Las notas pueden ser locales o globales y deben estar en tiempo presente o futuro. Las notas globales se refieren a la pieza o dibujo como un todo, se representan en una posición central bajo la proyección a la cual se aplican o en una columna de notas generales, ejemplo: redondeos y filetes, radio 2; eliminar filos, etc. Las notas locales se aplican sólo a los requerimientos locales y se conectan mediante un símbolo al elemento al cual se aplica la nota, ejemplo: 4 agujeros de 6 pulgadas de diámetro., rosca M12x1.25, etc.

El producto solicitado se identifica mediante uno o una serie de planos. Estos productos pueden ser, en algunos casos, bastantes complejos y por tanto la interpretación correcta de la información contenida en los planos es de suma importancia. El planeador de procesos analiza los planos y los usa para localizar puntos, dimensiones, tolerancias, especificaciones de materiales, acabados superficiales y cualquier otro dato pertinente. La mayoría de las decisiones posteriores que toma el planeador de procesos dependen directamente de la información extraída de dichos planos.

Hay 3 grupos principales de información que describen completamente un producto o pieza:

- Información geométrica.** Da la descripción básica de la forma de la pieza, por ejemplo: diámetro de un agujero, profundidad de una ranura, ancho de un cuñero, etc.
- Información tecnológica.** Corresponde a la información que especifica tolerancias, acabado superficial, circularidad, ovalamiento (runout), etc. Los datos tecnológicos influyen considerablemente en la determinación de la secuencia de mecanizado, procedimientos de fabricación, selección de la máquina y de los dispositivos de sujeción.
- Información general.** Características globales aplicables a la pieza completa, que se adicionan a sus especificaciones, por ejemplo:





número de piezas, material, código del diseño, parte número o número de identificación de la parte o pieza y otros detalles de tareas que se anexan al dibujo y al plan de operaciones. Esta información influye en las decisiones de planeación, tales como selección del proceso y de los parámetros de corte (velocidad de corte, avance, profundidad de corte) necesarios para fabricar el producto.

2.4.2 Información Geométrica. La geometría de una pieza es la entrada principal para los procesos de diseño y manufactura. La información geométrica de un producto incluye superficies, bordes y dimensiones. La pieza y su correspondiente información geométrica se representa en un plano mediante un dibujo que muestra de manera clara y exacta la forma del producto. Esta representación se hace dibujando un número de vistas separadas como si el objeto fuera observado desde diferentes posiciones a las cuales se le adiciona la información pertinente mediante líneas, números, símbolos y notas, con el fin de definir características denominadas geométricas como longitudes, ángulos, diámetros, y posiciones. En general, cada punto, línea o superficie se ubica mediante un solo conjunto de cotas³. La información adicional se puede indicar a través de notas explicativas o en el cuadro de títulos.

2.4.3 Información Tecnológica. Corresponde a una serie de datos que complementa la información geométrica con el fin de generar y adecuar las superficies generadas, a los requerimientos de la pieza, tales como superficies de referencia, tolerancias, rugosidad superficial, etc.

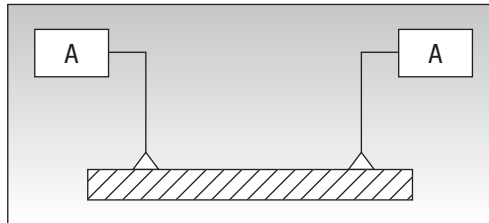
2.4.3.1 Superficies de referencia. Se entiende por referencia un punto geométrico exacto, una línea recta, un eje, un plano, al cual se le relacionan detalles de tolerancia; para un detalle con tolerancia las referencias pueden usarse en forma combinada. Se entenderá como punto de referencia el punto, línea, o área de la pieza que se usa para contacto con el equipo de fabricación e inspección. En general, un símbolo de referencia es un elemento real de la pieza y se usa para establecer la localización de otro elemento. El símbolo de referencia está constituido por una línea principal que termina en un triángulo relleno o vacío y una letra mayúscula encerrada en un cuadro, figura 2.4.

³ Cotitas: Medio para especificar las dimensiones de un producto. Utilizan líneas de extensión, líneas auxiliares, puntas de flecha, indicadores y números.





Figura 2.4 Ejemplo de identificación de superficies de referencias



2.4.3.2 Tolerancias. La tolerancia se define como la cantidad total que se permite variar a una dimensión⁴ determinada; es la diferencia entre los límites superior e inferior especificados. Las tolerancias se pueden clasificar como tolerancias dimensionales y tolerancias geométricas. Las tolerancias dimensionales pueden ser unilaterales o bilaterales dependiendo de la dirección en la cual se permite la variación. Otra forma de expresar las tolerancias es mediante el sistema ISO, en el cual la dimensión especificada precede a la tolerancia expresada mediante una letra y un número, figura 2.5.

Figura 2.5 Ejemplo de tolerancias dimensionales. a) unilaterales b) bilaterales c) sistema ISO

$20 \begin{matrix} +0,03 \\ 0 \end{matrix} 50 \begin{matrix} 0 \\ -0,04 \end{matrix}$	$20 \begin{matrix} +0,03 \\ -0,02 \end{matrix} 50 \begin{matrix} +0,02 \\ -0,04 \end{matrix}$	50H7 37g6
a	b	c

Las tolerancias geométricas consideran tolerancias de forma, orientación, localización y alineación, y se especifican con el fin de asegurar la funcionabilidad e intercambiabilidad de las piezas. Las tolerancias geométricas aplicadas a un elemento (punto, línea, eje, superficie, plano medio) definen el lugar donde está contenido el elemento referenciado. Las tolerancias geométricas se especifican sólo si son esenciales para garantizar el funcionamiento de la pieza. Las tolerancias dimensionales limitan ciertos errores de forma y posición.

⁴ Dimensión: Valor numérico expresado en las unidades apropiadas de medida e indicado en un dibujo por medio de líneas, símbolos y notas para definir el tamaño o característica geométrica, o ambos, de una pieza o producto.



Durante el proceso de fabricación se permite que las superficies generadas se desvíen de la forma geométrica especificada siempre y cuando se mantengan en el rango de las tolerancias dimensionales especificadas, pero si los errores de forma deben estar dentro de un rango estrecho, deben especificarse tolerancias geométricas las cuales se indican aun cuando se haya definido una tolerancia dimensional, tabla 2.1. Las tolerancias geométricas no requieren del uso de métodos especiales de producción, medición o calibración.

Si la tolerancia se aplica a una longitud específica, en cualquier dirección, el valor de esta longitud debe agregarse después del valor de la tolerancia separado por una línea oblicua. Esto significa que la tolerancia se aplica a todas las líneas en cualquier posición y dirección en la longitud restringida, de la siguiente manera:

//	0.01/100	B
----	----------	---

Si una tolerancia pequeña del mismo tipo, se agrega a la tolerancia de todo el elemento, pero limitada a una longitud específica, la tolerancia restrictiva se indica como sigue:

//	$\frac{0.1}{0.05 / 2.00}$	A
----	---------------------------	---

Si se especifican dimensiones teóricas exactas, estas no deben estar acompañadas de tolerancias, ya que están sujetas únicamente a las tolerancias de posición, perfil o angularidad especificadas dentro del símbolo de tolerancia, figura 2.6.

**Tabla 2.1 Símbolos utilizados para designar tolerancias geométricas.**

Características	Tolerancias	Característica tolerada	Símbolo
Característica sencilla	Tolerancias de forma	Rectitud	
		Planitud	
		Circularidad (redondez)	
		Cilindricidad	
Característica relacionada	Tolerancias de orientación	Paralelismo	
		Perpendicularidad	
		Angularidad	
	Tolerancias de localización o posición	Posición	
		Concentricidad y coaxialidad	
		Simetría	
	Tolerancias de relación	Alabeo circular (runout)	
		Alabeo total	

Fuente: Norma Icontec 1831

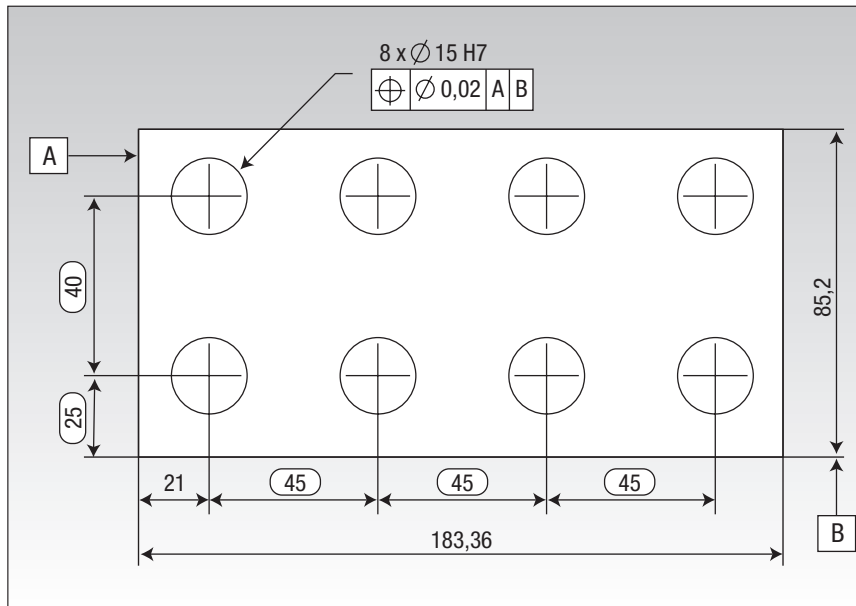
En algunos casos la tolerancia, orientación o localización se aplica no al elemento sino a su proyección externa, figura 2.7.

Al ensamblar piezas se debe garantizar una holgura (juego) o interferencia (forzada o por contracción) entre las piezas por ensamblar, llamada ajuste. Para determinar el tipo de ajuste se determina la condición de material máximo⁵ (MMC) y mínimo⁶ (LMC). El juego mínimo entre las partes ensambladas ocurrirá cuando están en condición de material máximo y será la diferencia entre ellas. El juego máximo se tendrá cuando las partes ensambladas están en condición de material mínimo y será su diferencia. La indicación que al valor de la tolerancia se aplica la condición de material máximo será (M), colocado después del valor de la tolerancia, de la letra del elemento de referencia o después o de ambos, figura 2.8.

⁵ Condición de material máximo: es la condición en la cual una característica de tamaño contiene la máxima cantidad de material dentro de los límites establecidos de tamaño.

⁶ Condición de material mínimo: es la condición en la cual una característica de tamaño contiene la mínima cantidad de material dentro de los límites establecidos de tamaño.

Figura 2.6 Ejemplo de tolerancias geométricas aplicadas a dimensiones teóricas exactas (valor dentro de un cuadro) de posición con respecto a 2 superficies A y B, y tolerancia dimensional norma ISO



2.4.3.3 Rugosidad superficial. Las superficies representan el contorno que se debe dar a la pieza, se define mediante líneas rectas, círculos ideales, agujeros redondos, bordes y superficies. El costo de una superficie mecanizada aumenta cuando se busca un mejor acabado superficial, razón por la cual se debe indicar claramente el valor deseado, ya que no siempre un buen acabado superficial garantizará un buen funcionamiento, además de generar costos innecesarios en el producto.

El exterior de una superficie tiene rugosidad, ondulación, fallas, patrones y direcciones que resultan del proceso mecánico realizado sobre la superficie. La rugosidad se refiere a desviaciones pequeñas con respecto a la superficie nominal, finamente espaciadas y características del material y los procesos utilizados para generarla, figura 2.9. La ondulación es una desviación mucho más espaciada que se origina debido a la deflexión del material de trabajo, vibración, tratamiento térmico y factores similares. La orientación es la dirección predominante de la textura superficial y está determinada por los procesos de manufactura usados para crear la superficie y comprenden grietas, rayas, inclusiones y defectos similares en la superficie.



Figura 2.7 Tolerancia geométrica localizada sobre una proyección del elemento

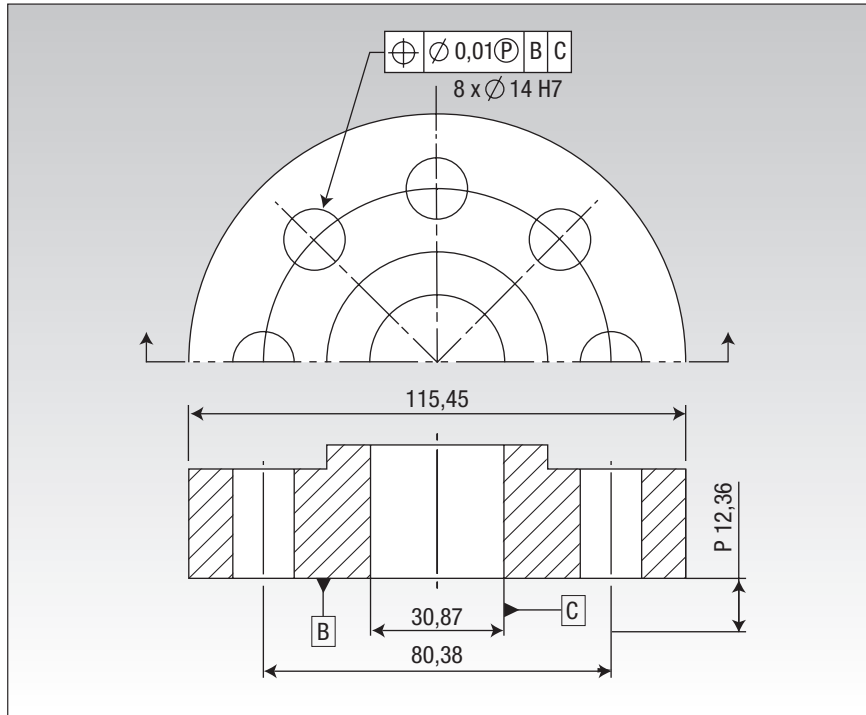


Figura 2.8 Diferentes formas de indicar la condición de material máximo en la especificación de la tolerancia geométrica.

- a) después del valor de tolerancia.
- b) después de la letra del elemento.
- c) después de ambos.
- d, e) aplicado a la superficie de referencia.

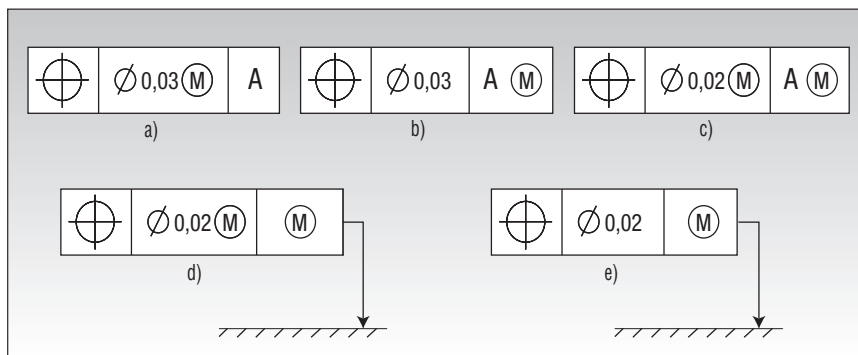




Figura 2.9 Posibles orientaciones de superficies mecanizadas y su representación en planos

SIMBOLO	INTERPRETACION	PATRON DE LA SUPERFICIE
=	Paralelo al plano de proyección de la vista en la cual se usa el símbolo	
⊥	Perpendicular al plano de proyección de la vista en la cual se usa el símbolo	
X	Cruzado en dos direcciones inclinadas con relación al plano de proyección de la vista en la cual se usa el símbolo	
C	Aproximadamente circular en relación con el centro de la superficie en la cual se usa el símbolo	

Fuente: GONZALEZ Carlos, ZELENY Ramón. Metrología. McGraw-Hill. México. 1995

La rugosidad superficial es una cantidad medible; el método de medición más común es con el rugosímetro, el cual posee un palpador de diamante con radio en la punta de 2.5 ó 10 μ m que recorre una longitud pequeña o longitud de muestreo sobre la superficie analizada. La rugosidad superficial puede definirse como el promedio de las desviaciones verticales con respecto a la superficie nominal, sobre una longitud específica de superficie. Para cuantificarla se usa la media aritmética (MA) fundamentada en los valores absolutos de la desviación, denominada superficie promedio, la cual se calcula de:

$$R_a = \sum_{i=1}^n \frac{|y_i|}{n}$$

Donde:

R_a : Valor de la media aritmética de rugosidad (micropulgadas, micrómetros)

y_i : Desviación vertical con respecto a la superficie nominal (micropulgadas, micrómetros)

n : Número de desviaciones en la longitud de muestreo, L_m





El método de la media aritmética (MA) es el más usado para medir la rugosidad, aunque algunas veces se utiliza la raíz cuadrada de la media (RCM). El valor de la rugosidad superficial depende del tipo de orientación de la superficie, por lo que su valor puede variar significativamente. La textura de la superficie o rugosidad superficial se indica mediante símbolos, figura 2.10, en ellos se indican valores promedio para la rugosidad, ondulación, longitud de corte, orientación y espaciado máximo de la rugosidad. Para reducir el riesgo de una interpretación falsa de los valores numéricos o grado de rugosidad, se presentan las equivalencias en la tabla 2.2.

Figura 2.10 Símbolos con indicación del principal criterio de rugosidad R_a .


Proceso de remoción de material			Significado
Opcional	Obligatoria	Prohibida	
			Una superficie con valor máximo de rugosidad superficial R_a de $3.2 \mu m$
			Una superficie con valor máximo de rugosidad superficial R_a de $6.3 \mu m$ y un mínimo de $1.6 \mu m$
			Símbolo básico. Se emplea cuando su significado se expresa mediante una nota
			Superficie mecanizada por eliminación de material
			Superficie a la cual no se permite la eliminación de material. Indica que la superficie debe quedar como fue obtenida, con o sin arranque de viruta.


Fuente: GONZALEZ Carlos, ZELENY Ramón. Metrología. McGraw-Hill. México. 1995


Tabla 2.2 Valores normalizados de rugosidad y su equivalencia.

Valores de rugosidad R_a		Número de grados de rugosidad
μm	$\mu pu lg$	
50	2000	N 12
25	1000	N 11
12.5	500	N 10
6.3	250	N 9
3.2	125	N 8
1.6	63	N 7
0.8	32	N 6
0.4	16	N 5
0.2	8	N 4
0.1	4	N 3
0.05	2	N 2
0.025	1	N 1

Fuente: GONZALEZ Carlos, ZELENY Ramón. Metrología. McGraw-Hill. México. 1995

2.4.3.4 Planitud. Grado en el cual todos los puntos de una superficie yacen en un plano único. Está condición se considera correcta cuando la distancia de cada uno de los puntos a una superficie con la forma geométrica ideal es igual o menor a la tolerancia definida. La ubicación de la superficie lineal ideal debe hacerse de tal manera que la distancia entre la superficie real y ella tenga el menor valor posible. Símbolo 

2.4.3.5 Circularidad. Para elementos de revolución como cilindros agujeros circulares o conos, la circularidad es el grado en el cual todos los puntos en la intersección de una superficie y un plano perpendicular al eje de revolución equidistan de dicho eje. Para la esfera, la circularidad es la condición para la cual todos los puntos sobre la intersección de la superficie de esta y un plano que pasa por el centro, son equidistantes a dicho centro. Símbolo 

2.4.3.6 Cilindricidad. Condición en la cual todos los puntos en una superficie de revolución, como en un cilindro, equidistan del eje de revolución. La localización de los cilindros coaxiales o círculos concéntricos se determina de tal manera que la distancia entre ellos sea mínima. Símbolo 



2.4.3.7 Concentricidad. Grado en el cual dos o más formas de la pieza tienen un eje común, ejemplo: agujero circular y superficie cilíndrica. La tolerancia especifica la excentricidad o desviación permisible máxima de la concentricidad. Símbolo \odot

2.4.3.8 Angularidad. Es la condición de una superficie o eje que guarda un ángulo especificado, diferente de 90° , con un plano o eje de referencia. Símbolo \sphericalangle

2.4.3.9 Perpendicularidad. Situación en la cual todos los puntos de una superficie, un plano intermedio o un eje, debe estar a 90° del plano o eje de referencia. Símbolo \perp

2.4.3.10 Rectitud. Grado en el cual una forma de una pieza como una línea o eje, es una línea recta. La tolerancia de rectitud especifica la zona dentro de la cual un eje o todos los puntos del elemento considerado deben encontrarse. La tolerancia de rectitud se aplica en la vista donde el elemento se vea como una línea recta. Símbolo —

2.4.3.11 Paralelismo. Es la condición en la cual una superficie o eje equidista en todos sus puntos de un plano o eje de referencia. Símbolo \parallel

2.4.4 Información general. Junto con la información geométrica y tecnológica, la especificación de la pieza por fabricar incluye algunos atributos tales como material de la pieza, cantidad por producir, etc. Estos detalles afectan las decisiones de planeación tales como la selección del proceso y los parámetros de corte (velocidad, avance y profundidad de corte). También se incluye en esta parte el número del diseño, el parte número o número de identificación de la pieza, el nombre de la pieza, etc, que aunque no son importantes para su fabricación, si lo son para su identificación.



2.5 Selección de materia prima

Dado que la programación de un proceso es la generación de un plan paso a paso para convertir materias primas en producto terminado, la selección de la materia prima para todas las piezas que se fabricarán, es el siguiente paso en la ruta de programación del proceso. En algunos casos, la composición química, el estado del material⁷, el tamaño de la materia prima están ya establecidos por el producto e indicados en los planos como especificación de material. Ya sea que las especificaciones de las materias primas provengan del diseño del producto (planos), o de otra fuente (ingeniería de procesos), la materia prima se debe especificar antes de proseguir la programación del proceso de fabricación. En resumen, la selección de la materia prima es un criterio importante en el proceso de planeación, considera atributos como forma, tamaño, dimensión y peso. Así como, determinar el exceso de material para garantizar, la exactitud dimensional y la rugosidad deseada a un bajo costo.

2.6 Determinación de las operaciones de fabricación y su secuencia

Este criterio permite determinar los procesos de fabricación adecuados y su secuencia para convertir formas, dimensiones y tolerancias de una pieza desde la materia prima hasta la pieza terminada. Algunas restricciones como accesibilidad y alistamiento pueden necesitar que algunas formas se mecanicen antes o después que otras. Por lo tanto, el tipo de máquinas y herramientas disponibles, así como el tamaño del lote influyen en la secuencia del proceso. Por otra parte, las herramientas disponibles y las que se puedan cargar en una máquina en particular, también pueden cambiar la secuencia. Los criterios para evaluar estas alternativas incluyen la calidad del producto fabricado y la eficiencia del mecanizado.

La rugosidad superficial y las tolerancias requeridas influyen en la secuencia de operaciones. Por ejemplo, una pieza con un agujero de baja tolerancia y baja especificación de acabado superficial, requiere una simple operación de taladrado. La misma pieza con tolerancias más estrechas y acabado superficial más fino, requiere de una operación de taladrado seguido de una operación de rimado para cumplir con las especificaciones de rugosidad y de tolerancia dimensional y geométrica.

⁷ Esta condición refleja los tratamientos realizados al material para modificar sus propiedades mecánicas

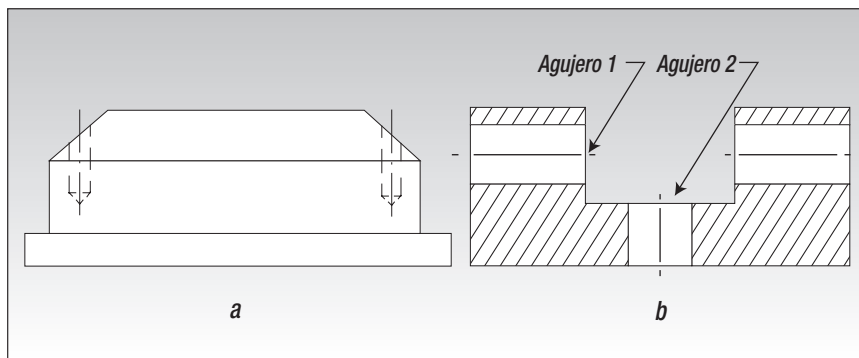




Algunas operaciones son dependientes unas de otras, figura 2.11a. Por ejemplo, el agujero debe taladrarse primero antes de fresar la superficie inclinada, porque el agujero no puede taladrarse sobre una superficie inclinada. Sin embargo, si la superficie inclinada tiene que estar acabada antes de taladrar, se debe utilizar una fresa para producir una superficie perpendicular al eje del taladro antes de taladrar.

Las fuerzas de corte y la rigidez de la pieza - máquina herramienta, también influyen en la secuencia de operación. Por ejemplo, el agujero 2, figura 2.11.b, debe hacerse antes de maquinarse la ranura. Si el agujero se hace después de producida la ranura, la pieza puede flexionarse. Estos ejemplos simples demuestran que la forma, dimensiones, y tolerancias de la pieza, la accesibilidad, sujeción y las restricciones de alistamiento, son algunos de los muchos factores que establecen los requerimientos de fabricación y su secuencia.

Figura 2.11 Operaciones dependientes una de otra a) primero se hace el taladrado y luego el fresado porque el agujero no tiene especificaciones exigentes b) el agujero 2 debe hacerse antes que el agujero 1 para evitar la flexión de la pieza.



2.7 Selección de la máquina herramienta

El siguiente paso en la planeación de un proceso después de la determinación del proceso de fabricación y su secuencia, es la selección de la máquina de herramienta donde se realizarán estas operaciones. En la escogencia de una máquina herramienta influyen muchos factores, por ejemplo:

- Atributos^{8,9} relativos a las piezas tales como forma deseada, dimensiones de la pieza, tolerancia dimensional y forma de la materia prima.



- Atributos^{8,9}, relativos a la máquina herramienta tales como, capacidad, tamaño modo de operación (manual, semiautomática, automática, control numérico), capacidad de manejo de herramientas, entre otros.
- Atributos relativos a las piezas tales como forma deseada, dimensiones de la pieza, tolerancia dimensional y forma de la materia prima.

Los tres criterios básicos para seleccionar una máquina herramienta son: costo unitario de producción, tiempo principal de fabricación y calidad. Una estructura analítica⁸ para la selección de una máquina herramienta es:

1. Determinar el costo de fabricación de la pieza, el tiempo de fabricación de la pieza, calcular el tiempo de alistamiento y determinar la desviación estándar.
2. Calcular el costo unitario de fabricación, el cual se define como

$$X^o = k_i X^i - k_s X^s + k_i F(Y_i)$$

Siendo:

$k_i = 1 + k_s$, coeficiente tecnológico de entrada.

$k_s = \frac{SC}{1-SC}$, coeficiente tecnológico de salida.

SC = fracción de desperdicio generado; calculado mediante métodos estadísticos.

X^i = costo unitario de entrada, \$ / pieza.

X^s = costo unitario de desperdicio.

$F(Y_i)$ = costo unitario de proceso como función de la entrada, \$ / pieza

3. Cálculo de unidades de materia prima requeridas,

$$Y_i = k_i x Y^o$$

Donde:

Y^o = unidades que se desean fabricar

⁸ NANUA Singh. Systems approach to computer integrate design and manufacturing. John Wiley & Son, Inc. New York 1996. 643 p

⁹ MARK C. Planeación de procesos. Serie la Calidad Total. Limusa Editores. 1996. 59 p



4. Determinar el número de unidades rechazadas, por medio de:

$$Y_s = k_s \times Y^o$$

5. Calcular del tiempo principal de fabricación, a partir de:

$$T_f = S + (t \times Y_i)$$

Donde:

S = Tiempo de alistamiento de las piezas para maquinar, min.

t = Tiempo unitario de fabricación, min. / pieza.

La fracción de desperdicio generado se calcula siguiendo el procedimiento siguiente:

Se determina el posible número de piezas que están por fuera de la tolerancia superior por medio de:

$$Z^u = \frac{L_s - \mu}{\sigma}$$

Y el posible número de piezas que están por fuera de la tolerancia inferior es:

$$Z^i = \frac{L_i - \mu}{\sigma}$$

Los datos básicos que se necesitan son tolerancias de las partes, capacidad de proceso de las máquinas herramienta, costos de proceso, costos de materia prima y costo unitario de las piezas defectuosas. El costo unitario de proceso depende del tipo y tamaño de la máquina herramienta, volumen de producción e información relativa a la pieza.

La selección de la máquina herramienta es bastante compleja debido al número de factores involucrados. La estructura analizada aquí, no captura toda la información requerida. Por ejemplo, información cualitativa como baja, media o alta producción no se obtiene adecuadamente. Un sistema experto que incorpora algunos de los conocimientos cualitativos y cuantitativos de las máquinas herramientas, herramientas de corte y operaciones sería muy útil en la etapa de planeación. El usuario puede construir planes de procesos alternativos utilizando esta información. Para ilustrar la aplicación del modelo se desarrolla el siguiente ejemplo:

Ejemplo 2.1

Se van a fabricar 500 unidades de un eje con una dimensión de 1.000 ± 0.003 pulgadas. Seleccione la máquina adecuada utilizando la información de la tabla 2.3. Otros datos son:

$X^i = \$ 10.00$ Costo unitario de la materia prima

$X^s = \$ 2.00$ Valor unitario de las piezas defectuosas

$\mu = 1.0015$ pulgadas Valor de la media de la dimensión

Estos valores se resumen en la tabla 2.3

Solución

En primera instancia se hará un cálculo detallado para un torno revolver. Se calcula inicialmente la fracción de desperdicio:

Para el límite superior.

$$Z^u = \frac{L_s - \mu}{\sigma} = \frac{1.003 - 1.0015}{0.007} = 0.21$$

Tabla 2.3 Datos básicos de tipos de máquinas herramienta.

Tipo de maquina herramienta	Desviación estándar	Costo de fabricación (\$/pieza)	Tiempo de fabricación (min/pieza)	Tiempo de alistamiento (minutos)
Torno de torreta (revólver)	0.007	7	1	15
Torno paralelo	0.001	10	0.90	30
Torno automático de tornillo	0.0005	15	0.70	60

Fuente: Singh NANUA, Systems Approach to Computer Integrated Design and Manufacturing, John Wiley, 1996. 643 p

Para el límite inferior.

$$Z^i = \frac{L_i - \mu}{\sigma} = \frac{0.997 - 1.0015}{0.007} = 0.64$$

De la tabla de distribución normal, tabla 2.5, para $Z^u = 0.21$, se obtiene un valor de 0.58317; el porcentaje de las piezas defectuosas por encima de la tolerancia es:



Porcentaje de piezas defectuosas = $(100 - 58.317) = 41.683 \%$

Para el límite inferior, tabla 2.5, con $Z^i = 0.64$, el valor es 0.73891; el porcentaje de las piezas defectuosas por debajo del límite de este es:

Porcentaje de las piezas defectuosas $(100 - 73.891) = 26.109\%$.

La fracción de desperdicio es la suma de porcentajes para cada límite, es decir:

$$SC = 41.68 + 26.109 = 67.79 \%$$

Posteriormente se calcula el costo unitario de fabricación, a partir de:

$$X^o = k_i X^i - k_s X^s + k_i F(Y_i)$$

Los valores para cada una de las variables son:

$$k_s = \frac{SC}{1 - SC} = \frac{0.6779}{1 - 0.6779} = 2.1048$$

$$k_i = 1 + k_s = 1 + 2.1048 = 3.1048$$

$X^i = 10.00$ Dato del problema.

$X^s = 2.00$ Dato del problema.

Reemplazando, se tiene

$$X^o = 3.1048 * 10.00 - 2.1048 * 2.00 + 3.1048 * 7 = 48.57 \$/pieza.$$

Se hacen cálculos similares para las máquinas indicadas en la tabla 2.3. Estos valores se resumen en la tabla 2.4. El número de unidades de desperdicio es un indicativo de calidad.

Tabla 2.4 Costo unitario, desperdicio y tiempo muerto de fabricación para varias tecnologías.

Tipo de maquina herramienta	Costo unitario (\$/pieza)	Desperdicio (unidades)	Tiempo principal de fabricación (min)
Torno de torreta (revólver)	48.57	1052	1567.40
Torno paralelo	21.28	33	510.06
Torno automático de tornillo	25.03	1	410.70

Fuente: NANUA Singh, Systems Approach to Computer Integrated Design and Manufacturing, John Wiley, 1996. 643 p





❑ **Análisis de resultados**

Para los datos asumidos los resultados son interesantes. El torno revolver no es adecuado porque el costo unitario, el número de unidades defectuosas y los tiempos principales de fabricación, son altos comparados con otras tecnologías. Si las características del mercado sugieren rapidez y libertad de calidad la elección será el torno automático. Desde el punto de vista de costo unitario, el torno paralelo es la mejor opción.

2.8 Selección de herramientas, dispositivos de sujeción y equipo de medición

La combinación herramienta - máquina herramienta permite generar la forma de la pieza. El dispositivo de sujeción de la pieza se usa para localizar y sujetar la pieza para ayudar a generar la forma. El equipo de inspección se necesita para asegurar la exactitud dimensional, tolerancias y acabado superficial. La selección de la máquina herramienta, herramientas de corte, fijadores y equipo de inspección dependen principalmente de la forma de la pieza.

El principal propósito de un dispositivo de sujeción es mantener la pieza inmóvil. Estos aparatos incluyen pinzas, mordazas y fijadores de todo tipo. En general, los dispositivos de sujeción poseen diferentes superficies y puntos de referencia para alinear las piezas y las herramientas. Entre los dispositivos de sujeción más comunes se tienen:

- ❑ Aparatos operados manualmente tales como collares, mordazas, mandriles, platos de sujeción, etc.
- ❑ Dispositivos diseñados para un propósito especial tales como mordazas de potencia.
- ❑ Dispositivos de sujeción flexibles usados en sistemas de manufactura flexible. El objetivo es acomodar un rango de dimensiones y formas de piezas con la mínima intervención del operador.

Las formas, dimensiones, exactitud, rata de producción y variedad de piezas, generalmente determinan el tipo de dispositivo que se requiere. Por ejemplo, una copa de cuatro mordazas puede acomodar formas prismáticas, los collares sirven para sujetar manualmente formas cilíndricas, pero dentro de un rango determinado de diámetros. Algunos dispositivos de sujeción se diseñan para dimensiones y formas específicas.



2.9 Ciclos de fabricación

Se entiende como ciclos de fabricación el conjunto de operaciones ordenadas según una secuencia preestablecida, que debe llevarse a cabo sobre una pieza específica para convertirla en un producto terminado, utilizando utillajes y máquinas determinadas, respetando los tiempos asignados para el propio ciclo. En la mayoría de los casos una sola operación no es suficiente para concluir el ciclo de trabajo que debe cumplir una pieza para convertirse en producto terminado. En general, cada operación forma parte de una serie de actividades que van convirtiendo progresivamente un material en bruto (también llamado blanco) en producto terminado.

El estudio del ciclo de fabricación resulta de la necesidad de determinar, para cada pieza, la secuencia de operaciones más corta, empleando el menor tiempo posible con los medios adecuados y a un menor costo. Cuando se fabrica una pieza que agrupa diferentes operaciones, se hace importante la programación detallada de todo el proceso. Deben especificarse el número de operaciones, la forma de efectuarlas, su secuencia y sus tiempos de ejecución, con el fin de evitar pérdidas de tiempo.

Todo ciclo de fabricación está compuesto por una serie ordenada de operaciones. Cada operación está formada por un conjunto de actividades que el operario debe realizar, ya sea manualmente o en la misma máquina. En todo el ciclo, la secuencia de cada operación se identifica con un número que progresa de 10 en 10. Los números intermedios se reservan para el caso de operaciones intermedias.

2.10 Estudio del ciclo de fabricación

Por estudio del ciclo de fabricación se entiende el análisis y la realización de un programa para un ciclo completo. El estudio consiste en dividir el mecanizado de una pieza en una serie mínima de operaciones a las que se asigna un número, cada operación se realiza en el menor tiempo posible en la misma máquina o utillaje. La fabricación de la pieza puede requerir el uso de varias máquinas.

Tabla 2.5 Tabla de distribución normal

z	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	z
0,0	0,50000	0,50798	0,51198	0,51197	0,51595	0
0,1	0,53983	0,54379	0,54776	0,55172	0,55567	0,1
0,2	0,57926	0,58317	0,58706	0,59095	0,59483	0,2
0,3	0,61791	0,62172	0,62551	0,62930	0,63307	0,3
0,4	0,65542	0,65910	0,62276	0,66640	0,67003	0,4
0,5	0,69146	0,69497	0,69847	0,70194	0,70540	0,5
0,6	0,72575	0,72907	0,73237	0,73565	0,73891	0,6
0,7	0,75803	0,76115	0,76424	0,76730	0,77035	0,7
0,8	0,78814	0,79103	0,79389	0,79673	0,79954	0,8
0,9	0,81594	0,81859	0,82121	0,82381	0,82639	0,9
1,0	0,84134	0,84375	0,84613	0,84849	0,85083	1,0
1,1	0,86433	0,86650	0,86864	0,87076	0,80285	1,1
1,2	0,88493	0,88686	0,88877	0,89065	0,89251	1,2
1,3	0,90320	0,90490	0,90658	0,90824	0,90988	1,3
1,4	0,91924	0,92073	0,92219	0,92364	0,92506	1,4
1,5	0,93319	0,93448	0,93574	0,93699	0,93822	1,5
1,6	0,94520	0,94630	0,94738	0,94845	0,94950	1,6
1,7	0,95543	0,95637	0,95728	0,95818	0,95907	1,7
1,8	0,96407	0,96485	0,96562	0,96637	0,96711	1,8
1,9	0,97128	0,97193	0,97257	0,97320	0,97392	1,9
2,0	0,97725	0,97778	0,97831	0,97882	0,97932	2,0
2,1	0,98214	0,98257	0,98300	0,98341	0,98382	2,1
2,2	0,98610	0,98645	0,98679	0,98713	0,98745	2,2
2,3	0,98928	0,98956	0,98983	0,99010	0,99036	2,3
2,4	0,99180	0,99202	0,99224	0,99245	0,99266	2,4
2,5	0,99379	0,99396	0,99413	0,99430	0,99446	2,5
2,6	0,99534	0,99547	0,99560	0,99573	0,99585	2,6
2,7	0,99652	0,99664	0,99674	0,99683	0,99693	2,7
2,8	0,99744	0,99752	0,99760	0,99767	0,99774	2,8
2,9	0,99813	0,99819	0,99825	0,99831	0,99836	2,9
3,0	0,99865	0,99869	0,99874	0,99878	0,99882	3,0
3,1	0,99903	0,99906	0,99910	0,99913	0,99916	3,1
3,2	0,99931	0,99903	0,99936	0,99938	0,99940	3,2
3,3	0,99952	0,99903	0,99955	0,99957	0,99958	3,3
3,4	0,99966	0,99903	0,99969	0,99970	0,99971	3,4
3,5	0,99977	0,99903	0,99978	0,99979	0,99980	3,5
3,6	0,99984	0,99903	0,99985	0,99986	0,99986	3,6
3,7	0,99989	0,99903	0,99990	0,99990	0,99991	3,7
3,8	0,99993	0,99903	0,99993	0,99994	0,99994	3,8
3,9	0,99995	0,99903	0,99996	0,99996	0,99996	3,9

Fuente: NANUA Singh, Systems Approach to Computer Integrated Design and Manufacturing, John Wiley, 1996. 643 p

Tabla 2.5 Tabla de distribución normal (continuación).

Z	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	z
0	0,51994	0,52392	0,52790	0,53188	0,53586	0
0,1	0,55962	0,56356	0,56750	0,57144	0,57538	0,1
0,2	0,59871	0,60257	0,60643	0,61029	0,61415	0,2
0,3	0,63683	0,64058	0,64431	0,64808	0,65173	0,3
0,4	0,67364	0,67724	0,68082	0,68438	0,68793	0,4
0,5	0,70884	0,71226	0,71566	0,71904	0,72240	0,5
0,6	0,74215	0,74537	0,74857	0,75175	0,75490	0,6
0,7	0,77337	0,77637	0,77935	0,78230	0,78523	0,7
0,8	0,80234	0,80510	0,80785	0,81057	0,81327	0,8
0,9	0,82894	0,83147	0,83397	0,83646	0,83891	0,9
1,0	0,85314	0,85543	0,85769	0,85993	0,86214	1,0
1,1	0,87493	0,87697	0,87900	0,88100	0,88297	1,1
1,2	0,89435	0,89616	0,89796	0,89973	0,90140	1,2
1,3	0,91149	0,91308	0,91465	0,91621	0,91773	1,3
1,4	0,92647	0,92785	0,92922	0,93056	0,93189	1,4
1,5	0,93943	0,94062	0,94179	0,94295	0,94408	1,5
1,6	0,95053	0,95154	0,95254	0,95352	0,95448	1,6
1,7	0,95994	0,96080	0,96164	0,96246	0,96327	1,7
1,8	0,96784	0,96856	0,96926	0,96995	0,97062	1,8
1,9	0,97441	0,97500	0,97558	0,97612	0,97670	1,9
2,0	0,97982	0,98030	0,98077	0,98124	0,98169	2,0
2,1	0,98422	0,98461	0,98500	0,98537	0,98574	2,1
2,2	0,98778	0,98809	0,98840	0,98870	0,98899	2,2
2,3	0,99061	0,99086	0,99111	0,99134	0,99158	2,3
2,4	0,99286	0,99305	0,99324	0,99343	0,99361	2,4
2,5	0,99461	0,99477	0,99492	0,99506	0,99520	2,5
2,6	0,99598	0,99609	0,99621	0,99632	0,99643	2,6
2,7	0,99700	0,99711	0,99720	0,99728	0,99736	2,7
2,8	0,99781	0,99788	0,99795	0,99801	0,99807	2,8
2,9	0,99841	0,99846	0,99851	0,99856	0,99861	2,9
3,0	0,99886	0,99889	0,99893	0,99897	0,99900	3,0
3,1	0,99918	0,99921	0,99924	0,99926	0,99929	3,1
3,2	0,99942	0,99944	0,99946	0,99948	0,99950	3,2
3,3	0,99960	0,99961	0,99962	0,99964	0,99965	3,3
3,4	0,99972	0,99973	0,99974	0,99975	0,99976	3,4
3,5	0,99981	0,99981	0,99982	0,99981	0,99981	3,5
3,6	0,99987	0,99987	0,99988	0,99988	0,99989	3,6
3,7	0,99991	0,99992	0,99992	0,99992	0,99992	3,7
3,8	0,99993	0,99993	0,99993	0,99994	0,99994	3,8
3,9	0,99995	0,99993	0,99996	0,99996	0,99996	3,9

Fuente: NANUA Singh, Systems Approach to Computer Integrated Design and Manufacturing, John Wiley, 1996. 643 p



Algunas actividades pueden dividirse en un número variable de subactividades o fases, a las que se le asigna una identificación propia que corresponde a las diferentes operaciones realizadas en la misma máquina. Las actividades o fases se transcriben en un documento denominado hoja de operaciones, donde se escriben claramente y por separado, las operaciones que se deben realizar, los dispositivos, las herramientas y los instrumentos de medición que son necesarios para ejecutar la operación especificada; se indica también la máquina o máquinas en las cuales se realizará el trabajo. Cada actividades se detalla mediante un documento llamado hoja de fabricación, en el cual se incluyen los dibujos esquemáticos relativos a cada operación y fase del ciclo.

2.10.1 Hoja de ruta o diagrama de proceso. Las hojas de ruta o diagramas de proceso proporcionan un mayor detalle para quienes deben planear los procesos para producir una parte o pieza. El diagrama incluye el análisis detallado de las operaciones mencionadas para fabricar el producto. Esta herramienta de planeación desglosa el proceso en actividades que agrupa en cinco categorías: operación, transporte, inspección, demora y almacenamiento. Igualmente, registra la frecuencia con que ocurre cada una de las categorías, la distancia recorrida, la descripción y el tiempo de cada uno de los pasos, figura 2.12. Este documento permite realizar seguimiento a las órdenes de trabajo que están en proceso.

2.10.2 Hoja de operaciones. Es una herramienta de planeación útil para mejorar las operaciones durante el estado estable del proceso productivo. Una hoja de operaciones especifica la secuencia de operaciones para una parte o pieza particular. Suministra información como el tipo de máquina herramienta, herramientas, dispositivos de sujeción y operaciones que se necesitan para fabricar la pieza, figura 2.13.

Para cada actividad se especifican los tiempos de duración o de fabricación. La suma de los tiempos de alistamiento, de mecanizado y de preparación darán los tiempos de fabricación de cada operación, con este valor será posible calcular la producción horaria de las máquinas. Repitiendo el cálculo para cada operación se calculará el tiempo total de fabricación, por lo que bastará sumar los tiempos de fabricación para cada una de las operaciones.

Para cada actividad se especifican los tiempos de duración o de fabricación. La suma de los tiempos de mecanizado y de preparación darán los tiempos de fabricación de cada operación, con este valor será posible calcular la producción





horaria de las máquinas. Repitiendo el cálculo para cada operación se calculará el tiempo total de fabricación, por lo que bastará sumar los tiempos de fabricación para cada una de las operaciones.

2.10.3 Hoja de fabricación o de proceso. Una hoja de fabricación o de proceso, describe una actividad con mayor detalle del que es factible en una hoja de operación y suele incluir un esquema del trabajo por realizar. Suministra información acerca del trabajo, la máquina utilizada, el número de pasadas, dimensiones y los parámetros tecnológicos, velocidad de corte, avances y profundidad de corte recomendadas para la realización de la actividad, figura 2.14.

Figura 2.12 Modelo de diagrama de flujo o de proceso

Nombre de la pieza _____		Plano No _____		Resumen				
_____		Hoja de _____		○ Operación				
Nombre del conjunto _____		Fecha _____		⇒ Transporte				
_____		Responsable _____		□ Inspección				
Cliente _____		Tiempo de manufactura horas min		D Retrazo				
_____		_____		▽ Almacenamiento				
Recorrido mts	Tiempo min.	Actividades					No.	Descripción de la actividad
		○	⇒	□	D	▽		
OBSERVACIONES _____								





2.11.1 Tiempo de alistamiento. Es el tiempo durante el cual el operario prepara la máquina, la herramienta y la materia prima, incluye actividades como afilado de la herramienta, fijación de la pieza y de la herramienta, ajuste de la máquina, etc. El tiempo de alistamiento, t_a , depende directamente de la habilidad del operario, de la organización de su puesto de trabajo, de la disposición ordenada de las herramientas, de los accesorios y dispositivos de sujeción, de los instrumentos de medición, de la celeridad con que se transporte la pieza, entre otros factores. Deben incluirse factores de fatiga, de necesidad biológica, etc., los cuales se suman prolongando el tiempo de alistamiento en un porcentaje adecuado.

Figura 2.14 Modelo de hoja de fabricación

HOJA DE FABRICACIÓN

Nombre de la pieza:

Máquina:

Plano No:

Material:

Código:

Nombre operario Identificación máquina	
Descripción operación: Parámetros tecnológicos: desbaste V_c : _____ (m/min)(ft/min) f : _____ (mm) (pulg) t : _____ (mm) (pulg) n_p _____ N_w : _____ rpm Acabado: V_c : _____ (m/min)(ft/min) f : _____ (mm) (pulg) t : _____ (mm) (pulg) n_p _____ N_w : _____ rpm	Esquema de la operación a realizar
Tiempo de alistamiento (T_a) _____ (min) Tiempo de posicionamiento (T_p) _____ (min) Tiempo de mecanizado (T_m) _____ (min)	Tiempo total de fabricación (T_f) : (min) $T_f = T_a + T_p + T_m =$ _____ + _____ + _____ $T_f =$ _____

V_c : Velocidad de corte f : avance N_w : número de revoluciones husillo/herramienta t : profundidad de corte
 t_a : tiempo de alistamiento t_p : tiempo de posicionamiento t_m : tiempo de mecanizado t_f : tiempo total o principal de fabricación

2.11.2 Tiempo de Mecanizado. Es el tiempo en que se da la forma a la pieza mediante la eliminación de material (viruta). El tiempo de mecanizado, t_m , depende principalmente de actividades ligadas al tipo de mecanizado, a la máquina herramienta utilizada, al material de la pieza, a la clase de herramienta empleada, a la velocidad de corte, al avance, al número de pasadas, etc. Por consiguiente, el tiempo de mecanizado, t_m , puede determinarse tomando como base las expresiones indicadas en las figuras 2.15, 2.16, y 2.17, relativas a las máquinas empleadas.

Es importante diferenciar con exactitud los tiempos de preparación de los de mecanizado, especialmente con relación al número de piezas que se deben mecanizar. Si la operación de mecanizado se realiza a un lote pequeño de piezas¹⁰, el tiempo de alistamiento invertido por el operario tiene un fuerte efecto sobre el tiempo total de fabricación y por consiguiente, en el costo de fabricación. Por el contrario, si el número de piezas es grande¹¹, el tiempo de alistamiento influye muy poco en el tiempo total de fabricación, que depende fundamentalmente del tiempo de mecanizado y de posicionamiento.

2.11.3 Tiempo de posicionamiento. Son todos aquellos tiempos vinculados con las maniobras relacionadas a las operaciones de ajuste de la herramienta y de la máquina que se repiten cada pasada sobre la pieza, incluye, el acercamiento y alejamiento de la herramienta desde la última posición de corte hasta la nueva posición para iniciar un nuevo corte, el cambio a una nueva herramienta y su reubicación, la colocación de dispositivos o accesorios, etc.

¹⁰ Cuando está constituido por alrededor de algunas decenas de piezas.

¹¹ Algunos centenares de piezas

Figura 2.15 Estimación de parámetros para operaciones de fresado

Variable	Fresado Horizontal o Cilíndrico	Fresado Vertical o Frontal
Velocidad de corte	$V = \pi \times D \times N$ Donde: D diámetro de la pieza para trabajar, N velocidad de giro de la herramienta	$V_{\max} = \pi \times D \times N$ $V_{\text{media}} = \frac{\pi \times D \times N}{2}$
Avance	$f = f_t \times N \times n$ Siendo: n número de dientes del cortador	$f = f_t \times N \times n$
Tiempo de mecanizado	$t_m = \frac{L + 2A}{f}$ para cada pasada Donde: L es la longitud de la pieza $A = \left(\frac{D^2}{4} - \left(\frac{D}{2} - d \right)^2 \right)^{0.5}$ A = Distancia entre el punto de aproximación y el borde de la pieza d = Profundidad de corte	$t_m = \frac{L + 2A}{f}$ Donde : $A = \frac{D}{2}$ para $W = \frac{D}{2}$ hasta D $A = (W(D-W))^{0.5}$ para $W < \frac{D}{2}$ W: ancho de corte

2.11.4 Tiempo de fabricación. Se define como el mínimo tiempo teórico en el cual el operario debe ejecutar las diferentes operaciones de mecanizado que se requiere para la fabricación de una pieza. Está constituido por la suma de los tiempos de alistamiento, de mecanizado, y de posicionamiento. Cuando se conoce el tiempo de fabricación se puede determinar el número de piezas para producir en una hora, productividad horaria. Debe tenerse en cuenta que la productividad depende del estado de la máquina, de la edad y condiciones del operario. El valor real de la productividad horaria de una máquina específica se obtiene disminuyendo en un determinado porcentaje la productividad calculada a partir del tiempo de fabricación. En resumen, el tiempo total de fabricación se expresa como:

$$t_f = t_a + t_m + t_p$$

Para el cálculo de estos tiempos y del tiempo total de fabricación invertido en la manufactura de una pieza metalmeccánica, se desarrolló el programa “MATIC”, el cual se detalla, de manera breve, a continuación:

Figura 2.16 Estimación de parámetros para algunas operaciones de torno

Operación	Velocidad de corte	Tiempo de mecanizado
Torneado externo	$V = \pi \times D_w \times N$ $V =$ $D_w =$ diámetro de la pieza	$t_m = \frac{L + \text{tolerancia}}{f \times N}$
Taladrado	$V = \pi \times D_h \times N$ $D_h =$ diámetro agujero	
Torneado interno	$V = \pi \times D_i \times N$ $D_i =$ diámetro interno	
Refrentado	$V = \pi \times D_w \times N$ Velocidad máxima	$t_m = \frac{D + \text{tolerancia}}{2 \times f \times N}$
Tronzado	$V = \frac{\pi \times D_w \times N}{2}$ Velocidad media	

Figura 2.17 Estimación de parámetros para algunas operaciones del cepillo y limadora

Operación	Velocidad de corte	Tiempo de mecanizado
Mecanizado plano	V_a : depende del material para trabajar se escoge por tablas V_r : Se asume como el doble de la velocidad de corte	$t_m = \frac{L_c (V_a + V_r)}{V_a \times V_r} \times Z \times \eta_p$ Z : número de dobles carreras η_p : número de pasadas



2.12 Descripción del programa “Matic”

La pantalla principal presenta las máquinas herramientas convencionales más comunes en las Pyme metalmecánica, figura 2.18. Al activar cada opción de máquina se despliega en la pantalla interna las operaciones que se pueden realizar en cada máquina, figura 2.19.

En la mayoría de las ocasiones se deben especificar las unidades de trabajo indicando además si la operación por realizar corresponde a desbaste o acabado, figura 2.20.

Figura 2.18 Pantalla principal del programa MATIC, utilizado para calcular los tiempos de fabricación de una pieza metalmecánica.



figura 2.19 Operaciones que se pueden realizar en una máquina. Ejemplo para un torno

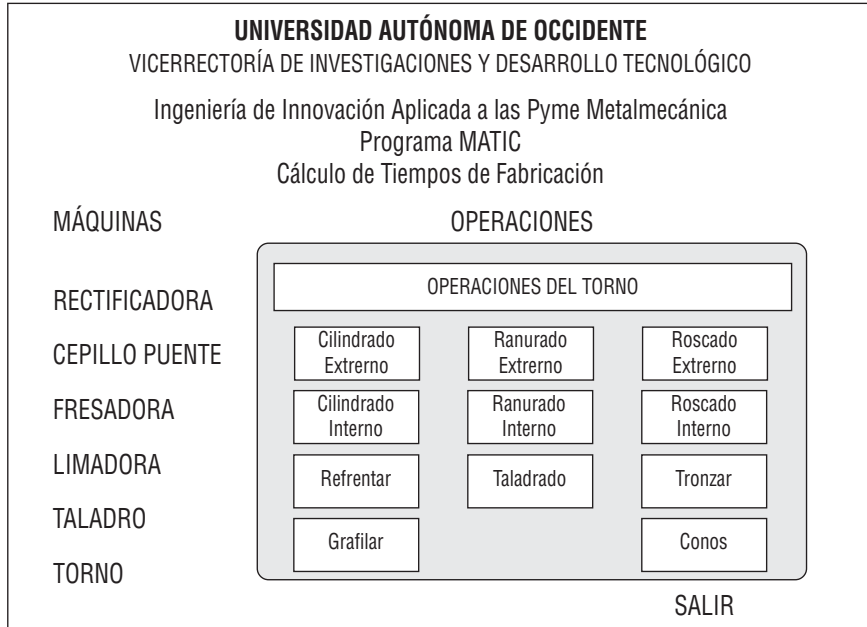
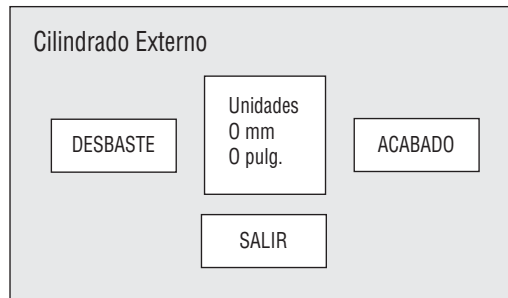


Figura 2.20 Ejemplo de selección de unidades y de operación a realizar, desbaste o acabado, para una operación de cilindrado externo.



Al seleccionar la operación por realizar, se despliega la pantalla de entrada de datos, la cual comprende las dimensiones iniciales y finales de la pieza, la longitud de corte, la selección de la herramienta y los parámetros de corte, figura 2.21.

Figura 2.21 Ejemplo de pantalla para especificar las condiciones de mecanizado para una operación de cilindrado externo

OPERACIÓN DE CILINDRADO EXTERNO
DESBASTE

Diámetro Inicial Diámetro Final Longitud de Corte

HERRAMIENTAS DE CORTE
Ferrosos/no ferrosos Aceros Aleaciones no ferrosas

Acero Rápido Carburos Carburos/Cerámicos

Material Velocidad de corte Avance

Profundidad de corte

ACEPTAR CANCELAR SALIR

Por último se tiene la pantalla resumen, figura 2.22, donde se recopila las dimensiones iniciales y finales de la pieza, la longitud de corte, la selección de la herramienta y los parámetros de corte para cada pasada, las revoluciones del husillo o herramienta, el tiempo de mecanizado total, y el tiempo de fabricación para cada operación en particular. Esta información se imprime y se continúa a la siguiente operación. El proceso descrito como ejemplo, se repite para cada una de las máquinas indicadas en la pantalla principal.

Figura 2.22 Ejemplo de pantalla resumen de la operación de desbaste de cilindrado exterior.

OPERACIÓN DE CILINDRADO, DESBASTE
RESUMEN

Diámetro Inicial Diámetro Final Longitud de Corte

Herramienta Material pieza

Velocidad de corte Avance Profundidad de corte

Profundidad por pasada Número de pasadas

Tiempo de mecanizado Tiempo de posicionamiento

Tiempo de alistamiento



3. Algoritmos para programación de tareas

Programar “es el proceso de organizar elegir y dar tiempos al uso de recursos para llevar a cabo todas las actividades necesarias para producir las salidas deseadas en los tiempos establecidos, satisfaciendo una serie de restricciones de tiempo y relaciones entre las actividades y recursos”. Si los recursos no están limitados no existe el problema. Se entenderán las actividades, como los trabajos por desarrollar y como recursos, las máquinas necesarias para la ejecución de los trabajos.

3.1 Procedimiento para solucionar un problema de programación

Algunas ideas a tener en cuenta al abordar un problema de programación son:

- Analizar el entorno de la programación (incluye trabajos, máquinas, medidas de desempeño, etc...).
- Estudiar los modelos de programación de una sola maquina. (se clasifican según las medidas de desempeño).
- Estudiar los sistemas de programación de capacidad finita, los software disponibles y la evolución de la programación.

3.2 Actividades

Las actividades por realizar dependen del ambiente en que se ejecuten.

- Fuera del ambiente de manufactura, las actividades pueden estar relacionadas con pacientes para rayos X, clientes en un restaurante, programas para correr en un computador, aviones que van a aterrizar en un aeropuerto, etc. En el ambiente de manufactura estas actividades pueden ser construir un molde de arena para la fabricación de una pieza metálica, la fabricación de un eje, la elaboración de una matriz, etc.
- Una vez que se inicie su ejecución, esta debe terminarse.
- Tiene una fecha de entrega en la cual el trabajo debe estar terminado.
- Puede tener una fecha de inicio, antes de la cual el trabajo no puede empezar.
- Pueden tener diferentes tipos de dependencias con respecto a otro trabajo.
- El tiempo necesario para un trabajo puede depender del procesamiento del trabajo anterior, esto se conoce como tiempo de preparación dependientes de la secuencia.
- Cuando los tiempos de preparación no dependen de la secuencia, pueden incluirse en el tiempo de fabricación.
- El trabajo solo puede procesarse en una máquina a la vez.

3.3 Recursos

Están representados en las máquinas necesarias para la realización de los trabajos. Las máquinas dependen del tipo de entorno. En el ambiente de



manufactura los entornos se clasifican en una sola máquina, máquinas paralelas, talleres de producción intermitente, producción continua y plantas abiertas. Si el problema para resolver está fuera del ambiente de manufactura una máquina puede representar un equipo de rayos X, un mesero en un restaurante, una computadora, una pista de aterrizaje, etc.

3.3.1 Una sola máquina. En éste entorno, se puede procesar solo un trabajo a la vez. Una vez procesado, el trabajo se termina.

3.3.2 Máquinas paralelas. En éste entorno, un trabajo se puede procesar en cualquiera de las máquinas disponibles. Una vez procesado por cualquiera de ellas, queda terminado. Se supone que todas las máquinas son idénticas. El tiempo para procesar un trabajo es independiente de la máquina.

3.3.3 Taller de producción continua. Sus características son:

- Contiene máquinas diferentes.
- Cada trabajo debe procesarse en una máquina exactamente una vez.
- Todos los trabajos siguen la misma ruta, pasan por la máquina en el mismo orden.
- Un trabajo no puede iniciar su proceso en la segunda máquina, hasta que no termine el de la primera, ejemplo, líneas de ensamble y células de manufactura.

3.3.4 Taller de producción intermitente. Es más general que el taller de producción continua, aquí cada trabajo tiene una ruta única, un trabajo debe pasar por varias máquinas, en diferente orden y no necesariamente por las mismas máquinas, ejemplo, talleres metalmecánicos.

3.3.5 Talleres abiertos. Son aquellos en que los trabajos no tienen una ruta específica, ejemplo, talleres de reparación de vehículos. El orden de los trabajos carece de importancia.



3.4 Objetivo de la programación

El objetivo de la programación es medir el desempeño ya sea maximizando la ganancia o minimizando el costo. Dada la dificultad de estimar los parámetros anteriores se utilizan los objetivos sustitutos normales, los cuales son funciones normales de tiempos de terminación para un programa dado. Las variables a utilizar son:

- n: número de trabajos a realizar.
- m: número de máquinas.
- p_{ik} : tiempo procesado del trabajo i en la maquina k (p_i , si $m = 1$).
- r_i : tiempo de liberación de la orden (fecha de distribución) del trabajo i.
- d_i : fecha de entrega del trabajo i.
- w_i : ponderación del trabajo i respecto a los otros trabajos.
- C_i : tiempo de terminación del trabajo i.
- $F_i = C_i - R_{i,v}$, tiempo de flujo del trabajo i ($F_i > 0$), tiempo de flujo total $\sum F_i, i=1,n$.
- $L_i = C_i - d_i$ retraso del trabajo i ($L_i < 0$).
- $T_i = \max(0, L_i)$ tardanza del trabajo i.
- $E_i = \max(0, -L_i)$ adelanto del trabajo i.
- $\delta_i = 1$ si el trabajo i se atrasa ($T_i > 0$).
- $\delta_i = 0$ si el trabajo i esta a tiempo o se adelanta ($T_i = 0$).
- $C_{\max} = \max_{i=1, n} \{C_i\}$ tiempo máximo de terminación de todos los trabajos.
- $L_{\max} = \max_{i=1, n} \{L_i\}$ retraso máximo de todos los trabajos.
- $T_{\max} = \max_{i=1, n} \{T_i\}$ tardanza máxima de todos los trabajos.

3.5 Objetivos sustitutos

Los objetivos sustitutos son una función del tiempo de terminación. El propósito es minimizar la función objetivo, la cual se incrementa, si al menos un tiempo de terminación aumenta.



Los objetivos sustitutos buscan:

- Disminuir el tiempo de flujo total.
- Disminuir la tardanza total.
- Disminuir el tiempo máximo de terminación.
- Disminuir la tardanza máxima o el número de trabajos atrasados.
- Minimizar el tiempo máximo de terminación (C_{\max}), equivale a minimizar el tiempo ocioso o maximizar la utilización de las máquinas.
- Minimizar el tiempo de flujo es lo mismo que minimizar el tiempo de terminación, de retraso y los tiempos de espera de los trabajos.

Otras consideraciones a tener en cuenta

- Las variables C_{\max} , L_{\max} , T_{\max} no son sumas, las variables resultantes lo son.
- Si los trabajos no tienen la misma importancia, se calcula una medida ponderada, multiplicándola por el peso apropiado (w) para el trabajo.
- Si los costos de mantener inventario dominan, el tiempo de flujo ponderado es una medida equivalente.
- El tiempo de espera de los trabajos es inventario en proceso, de manera que, minimizar los tiempos de flujo, equivale a minimizar el número de trabajos en proceso.
- El número de trabajos retrasados, la tardanza máxima y la tardanza total son medidas del servicio al cliente.
- En los problemas de programación se supone que los tiempos de preparación son independientes de la secuencia, que los trabajos están disponibles de inmediato ($r_i = 0$), no existe precedencia entre los trabajos y una vez se comienza un trabajo, este se termina.

3.6 Algoritmos de programación

Un algoritmo es un método o procedimiento para proporcionar una solución a un problema planteado mediante un modelo. Los algoritmos pueden ser exactos o heurísticos, en cualquier caso, proporcionan soluciones muy cercanas a la solución óptima.





A los algoritmos heurísticos se les atribuyen dos características importantes: calidad y eficacia. La calidad depende de la diferencia existente entre la solución heurística y la óptima, la eficacia, cota del peor caso, es la dificultad que se tiene para resolver el modelo. La cota del peor caso sobre la eficacia determina el número de iteraciones que debe realizar el algoritmo para solucionar cualquier problema real de un tamaño específico. La calidad y la eficacia se pueden expresar teórica o empíricamente. Las pruebas empíricas aplicadas a los algoritmos heurísticos consisten en resolver un determinado número de problemas reales y analizar los resultados.

3.7 Modelos utilizados para programar una máquina

Para este propósito se dispone de diversos algoritmos para aplicar a modelos con variables tales como: tiempo de flujo, retraso, tiempo de flujo ponderado; algoritmos sencillos para minimizar el retraso máximo y la tardanza máxima. Cuando el propósito es minimizar el número ponderado de trabajos tardíos, se utiliza un algoritmo heurístico. Para el caso de tiempos de programación dependientes de la secuencia, se emplea el algoritmo de ramificación y acotamiento.

3.7.1 Algoritmo para tiempo de flujo mínimo. Con éste algoritmo se minimiza el tiempo de flujo total. El algoritmo se expresa así:

$$F = n p_1 + (n-1) p_2 + (n-2) p_3 + \dots + P_n$$

Los elementos por considerar para aplicar este modelo son:

- Todos los trabajos tienen la misma importancia.
- Todos los trabajos para programar están disponibles.
- El tiempo de liberación de la orden es cero, es decir, que el tiempo de flujo es igual al tiempo de terminación.
- El trabajo que se debe colocar en la primera línea es el de menor tiempo de fabricación.
- Los trabajos siguientes se ordenan en orden creciente de tiempos de procesado.
- La secuencia de trabajos ordenados del tiempo de procesado más corto al más largo se denomina tiempo de procesado mínimo (TPC).





- La secuencia TPC minimiza el tiempo total de flujo de los trabajos en el sistema y el tiempo de espera total..
- Los tiempos de procesamiento son constantes.
- Minimiza el número de trabajos que esperan ser procesados (inventario promedio de trabajos en proceso), medido en número de trabajos.

Algoritmo para retraso. El propósito de este algoritmo es minimizar el retraso total. El retraso de un trabajo i se expresa como $L_i = C_i - d_i$. Por lo tanto, el retraso total es:

$$\sum_{i=1}^n L_i = \sum_{i=1}^n (C_i - d_i) = \sum_{i=1}^n C_i - \sum_{i=1}^n d_i$$

Siendo $\sum d_i$ una constante para cualquier programa; al maximizar el tiempo de terminación total también se minimiza el retraso total.

3.7.1.2 Algoritmo para tiempo de flujo ponderado. Se recomienda cuando los trabajos por realizar no tienen la misma importancia o prioridad (peso). Sea w_i el peso del trabajo i , programado en la i -ésima posición, el tiempo de terminación de este trabajo será la secuencia de los tiempos de proceso de los trabajos en las posiciones $k= 1, i$ o $C_i = p_1 + p_2 + \dots + p_i$ si las órdenes de todos los trabajos se envían en el tiempo cero, el tiempo de terminación será:

$$\sum w_i C_i = w_1 C_1 + w_2 C_2 + \dots + w_n C_n.$$

Si todos los trabajos tienen el mismo peso (w_i), la secuencia TPC, tiempo de procesamiento más corto será la óptima. Por el contrario, si el tiempo de proceso es igual para todos los trabajos, el primer trabajo para procesar será el de mayor peso o importancia y así sucesivamente en orden decreciente.

Las características de este algoritmo son:

- El tiempo de terminación de un trabajo es el tiempo que pasa en inventario.
- El valor del inventario en cualquier tiempo, es el valor de los trabajos que esperan ser procesados.



- Un trabajo con importancia alta (w_i) y un tiempo de procesado bajo debe programarse de primero, mientras que un trabajo de tiempo de proceso alto y baja importancia debe programarse después.
- Un peso mayor implica que el trabajo es más importante.
- Un método para establecer la secuencia de programación más sencilla es calcular la razón tiempo de proceso/ peso (ponderación) y ordenar los resultados en orden no decreciente, es decir, el trabajo que tenga el cociente más pequeño se programa primero; a este método se le conoce como secuencia de tiempo de proceso ponderado más corto (TPPC).

3.7.2 Algoritmo para tardanza máxima y retraso máximo. El objetivo principal que se pretende con éste algoritmo es maximizar la satisfacción del cliente. Para cumplir con esta meta se deben considerar las fechas de entrega, lo que induce a colocar de primero el trabajo con la fecha de entrega más cercana y así sucesivamente en orden no decreciente. Esta secuencia se denomina fecha de entrega más cercana (FEC).

3.7.3 Algoritmo para minimizar el número de trabajos tardíos. Para abordar éste modelo se utiliza el algoritmo de Hodgson. El propósito al aplicar este método es minimizar el número de trabajos tardíos, lo cual permite en la secuencia identificar y mover trabajos tardíos para que estos trabajos tengan tiempo de terminación más cortos. En general, se mueve el trabajo con el tiempo de terminación más largo y se coloca al final de la secuencia. El procedimiento para aplicar el algoritmo de Hodgson es el siguiente:

- Se establece la secuencia (FEC) fecha de entrega más cercana de los trabajos para realizar.
- Se hace $N_T = 0$ número de trabajos tardíos, y se calculan las tardanzas para determinar el número de trabajos tardíos y su posición k .
- Se calcula el trabajo con el tiempo de procesado más largo para las posiciones 1 a k , sea $p_j = \max_{i=1, k} p_i$, donde j es el subíndice del trabajo con el tiempo de procesado más largo entre los n_i trabajos.
- Se suprime el trabajo p_j de la secuencia, se hace $N_T = N_T + 1$ y se repite el paso 1.
- Los trabajos que se suprimieron se mueven al final de la secuencia, en cualquier orden. Esta secuencia minimiza el número de trabajo tardíos.



3.7.3.1 Algoritmo para minimizar el número ponderado de trabajos tardíos. Se emplea cuando los trabajos tardíos no tienen la misma importancia. Dado que no se reporta en la literatura un algoritmo para resolver este modelo se sugiere utilizar el algoritmo de Hodgson, moviendo, entre los primeros k trabajos, aquellos con el mayor cociente entre el tiempo de procesado y el peso “ w ”, en lugar del tiempo de procesado más largo.

El procedimiento es el siguiente:

1. Se establece la secuencia de los trabajos por realizar con base en la fecha de entrega mas cercana (FEC).
2. Se hace $N_T = 0$, número de trabajos tardíos, se calculan los tiempos de terminación y las tardanzas, para determinar el número de trabajos tardíos y su posición k en la secuencia.
3. Se valoran las cocientes entre el tiempo de procesado y el peso de los trabajos (p_i/w_i) y se selecciona el cociente de mayor valor.
4. Se quita de la secuencia el trabajo con el cociente de mayor valor y se repite el paso 1.
5. Los trabajos que se quitaron se colocan al final de la nueva secuencia, y se repite el proceso.

3.7.3.2 Algoritmo para tiempo de flujo mínimo sin trabajos tardíos. Para el desarrollo de este algoritmo se debe construir un conjunto programable de trabajos que tengan fechas de entrega mayores o iguales a la suma de todos los tiempos de procesado,

$$F_n = \sum_{i=1,n} (C_i - r_i).$$

Los pasos que se deben seguir para desarrollar el algoritmo son:

1. Entre los trabajos programables se elige el que tenga la fecha de entrega más larga y se programa como último.
2. Se calcula el tiempo de flujo de todos los trabajos que constituyen el conjunto programable,

$$F_n = \sum_{i=1}^n (C_i - r_i)$$

y se le resta el tiempo de proceso del trabajo que se ubicó en el último lugar de la secuencia,

$$F_{n-1} = \sum_{i=1}^{n-1} (C_i - r_i)$$

es decir el trabajo que tiene la fecha de entrega más larga.

3. De los trabajos restantes se suprime el que tenga la fecha de entrega más larga, se programa de penúltimo y se repiten los pasos 2 y 3.

Para el caso de tiempo de flujo ponderado, se programa como último el trabajo con menor cociente peso/tiempo de procesado. Para este caso, es probable que la solución obtenida no sea la óptima.

3.7.4 Algoritmo para minimizar la tardanza mínima. Para ilustrar la aplicación de éste algoritmo de tardanza en una sola máquina, se presenta el procedimiento heurístico de despacho, propuesto por Rachamadugu y Morton en 1982, para resolver el problema de tardanza ponderada.

Para resolver el heurístico se requiere:

- De la razón entre el peso y el tiempo de proceso, denominada la RPTP. Elegir la mayor razón, RPTP, equivale a escoger el menor cociente entre el tiempo de procesado y el peso, es decir, el tiempo de procesado ponderado más corto (TPPC).
- De la holgura de un trabajo i , definida como:

$$S_i = d_i - p_i - t$$

Donde;

d_i : fecha o tiempo de entrega

p_i : tiempo de procesamiento

t : tiempo real, $t = 0$ si el problema es estático

S_i : holgura de un trabajo

- Calcular la variable S_i^* definida como:

$$S_i^* = \text{Max} \{0, S_i\}$$



- Calcular el tiempo promedio de procesamiento de los trabajos.

$$p_{prom} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n p_i$$

- Calcular el número promedio de las duraciones de los trabajos hasta que el trabajo j sea tardío, definida por:

$$\frac{S_j^*}{P_{prom}}$$

Si un trabajo tiene $\frac{S_j^*}{P_{prom}} = 1$, puede demorarse un período igual a la duración promedio del trabajo y todavía estar a tiempo.

- Calcular la prioridad de un trabajo i a partir de.

$$\gamma_i = \left[\frac{w_i}{p_i} \right] e^{-\left[S_j^* / K p_{prom} \right]}$$

Donde K es un factor de conversión para problemas estáticos de una sola máquina. Se le asigna un valor de 2.

- Establecer la secuencia de trabajo en orden descendente de prioridades.

Consideraciones.

- Un trabajo con holgura positiva puede retrasarse y tener tardanza cero.
- Si la holgura es negativa, $S_i^* = 0$.
- Si S_i^* disminuye el trabajo tiende a tener tardanza. Si por el contrario su valor es grande, pasara mucho tiempo para que sea tardío.

3.7.5 Algoritmo de adelanto y tardanza mínimos con fecha de entrega común. Este algoritmo considera el adelanto tan costoso como la tardanza. Se expresa como:

$$Z = \sum_{i=1}^n (E_i + T_i),$$

siendo la mejor solución aquella que propone una sanción total Z más pequeña. Se presentan dos casos: fecha de entrega no restringida y fecha de entrega restringida.

3.7.5.1 Caso de fecha de entrega no restringida. El procedimiento es el siguiente:

es el siguiente:

1. Determine los tiempos de procesado y tabúelos en orden descendente de mayor a menor tiempo, es decir $p_1 \geq p_2 \geq \dots \geq p_n$, trabajos a tiempo en TPL, trabajos tardíos en TPC (programa en forma de V). El trabajo con el tiempo de proceso más largo será el número 1, el que sigue será el número 2 y así sucesivamente.
2. Determine el trabajo cuya posición j es el menor entero mayor o igual de $n/2$, siendo “n” el número de trabajos. Si “n” es par, se tiene igual número de trabajos antes y después de la fecha de entrega. Si “n” es impar hay un trabajo adicional después de la fecha de entrega.
3. Organice los trabajos de acuerdo a la secuencia.

$$1 - 3 - 5 - 7 \dots n \dots 6 - 4 - 2$$

4. Asigne los tiempos de procesos a cada trabajo ordenado en el numeral 1.
5. Realice la suma $\Delta = p_1 + p_2 + \dots + p_{j^*}$, donde $(j^*) = (n/2)$
6. Calcular los tiempos de terminación para cada trabajo, así:

Para el primer trabajo,

$$C_{i=1} = t_{i=1} + p_{i=1}$$

siendo t el tiempo de inicio de elaboración del trabajo $i=1$ y $p_{i=1}$ el tiempo de proceso de dicho trabajo. Si $t_1 = 0$, el tiempo de terminación de dicho trabajo es igual al de proceso. Para los trabajos siguientes se obtiene de:

$$C_{i+1} = C_i + p_{i+1}$$

7. Determinar el adelanto y la tardanza definidos como: $E_i = \{0, -L_i\}$ y $T_i = \{0, L_i\}$ respectivamente, donde $L_i = C_i - d_i$ y d_i es la fecha de entrega del trabajo i
8. Construir la tabla siguiente para resumir los valores calculados.

Trabajos (LPT)		1	2	3	-	$(j^*)=n_i/2$	-	n_i
Tiempo de proceso	p_i							
Secuencia								
Tiempo de proceso	p_i							



Suma de tiempos								
Tiempo de terminación	C_i							
Adelanto	E_i							
Tardanza	T_i							

9. Fijar la fecha de entrega y denominarla como D.
10. Si $D > \lambda$, se comprueba que es un problema de fecha de entrega no restringida y los trabajos se programan de manera que $C_j^* = D$, esto define la fecha de inicio del trabajo¹. La condición $D > \lambda$ establece la validez del programa.
11. Por último, calcular la sanción total, es decir, $Z = \sum (E_i + T_i)$. El mejor programa está caracterizado por el menor valor de la sanción Z.

3.7.5.2 Caso de fecha restringida. Una de las aplicaciones del heurístico es solucionar problemas en los que el costo del adelanto difiere del costo de la tardanza, donde las sanciones por adelanto/ tardanza dependen del trabajo y para fechas de entregas distintas.

Consultando la tabla resumen del caso de fecha no restringida, se determina si $D < \lambda$, en caso afirmativo, es un caso de fecha restringida. Para ilustrarlo, se usa el heurístico de Sundararaghavan y Ahmed (1984), el cual utiliza un programa en forma de V comenzando en el tiempo cero. La siguiente tabla, facilita la comprensión del heurístico S&A.

B	b		A		a	
k	p_k	B_k	b_k	A_k	a_k	Posición (P)
1						
2						
-						
n						

Los pasos que se deben seguir para solucionar el heurístico son:

1. Se ordenan los trabajos adecuados a su tiempo de proceso. El que tenga mayor tiempo de procesamiento será el primero y así sucesiva-





mente en orden descendente hasta considerar el trabajo “n”. Tales valores se colocan en la segunda columna de la tabla.

2. Para $k = 1$, $B_k = B$, $A_k = A$, $b_k = 1$, $a_k = n$. Si $B > A$ entonces asigne la posición $P_k = b_k$, calcular $B_{k+1} = B_k - p_k$; $b_{k+1} = b_k + 1$; $A_{k+1} = A_k$ y $a_{k+1} = A_k$. Si $B < A$, entonces, asigne la posición $P_k = a_n$. Calcular $A_{k+1} = A_k - p_k$; $B_{k+1} = B_k$; $A_{k+1} = A_k - 1$ y b_{k+1} .
3. Haga $k = k + 1$, para $1 < k < n$. si $B > A$ entonces asigna la posición $P_k = b_k$, calcular $B_{k+1} = B_k - p_k$; $b_{k+1} = b_k + 1$; $A_{k+1} = A_k$; $a_{k+1} = a_k$. Si $B < A$ entonces asignar $P_k = a_k$. Calcular $A_{k+1} = A_k - p_k$; $B_{k+1} = B_k$; $a_{k+1} = a_k - 1$; $b_{k+1} = b_k$.
4. Aumente k , $k = k + 1$ y repita el proceso.

3.7.6 Programación dinámica. Se dice que un problema es de programación dinámica, cuando no se conocen todos los datos desde el inicio, es decir, que a medida que un grupo de trabajos se ejecutan, se reciben más trabajos. Debe recurrirse a enfoques heurísticos o enumerativos para solucionar el problema de programación. El grupo de trabajos a programar contiene actividades con tiempo de liberación menor o igual a la fecha actual.

Un heurístico posible será programar el trabajo siguiente del grupo programable con el menor tiempo procesado, que aunque no garantiza una solución óptima, es una buena alternativa.

3.7.7 Tiempos de preparación dependiente de la secuencia. Como ejemplo de este caso se tiene la fabricación de productos y partes de plásticos en una máquina de moldeo por inyección, tales como, tapas de plástico para envases de crema de afeitar, crema dental, entre otros productos. Debido a que la fabricación de un nuevo producto implica un cambio de dado y nuevas condiciones de operación como temperatura, presión y control de la humedad, ejemplo el emvasado de refrescos y la fabricación de pinturas, el tiempo de cambio de producto puede ser largo y depender de la pieza anterior.

Para el desarrollo de este heurístico se define p_{ij} como el tiempo para procesar el trabajo j si su antecesor inmediato es el trabajo i . Para evitar la precedencia de un mismo trabajo se establece $St_{ij} = \text{infinito}$. Como los tiempos de precedencia dependen de la secuencia, se afirma que el lapso $C_{\max} = \max_{i=1..n} \{C_i\}$ no es independiente de ella.





3.7.7.1 Heurístico para el tiempo de preparación más corto. El procedimiento a seguir para el desarrollo de este heurístico es el siguiente:

- Construya una matriz $n \times n$ donde se especifique los tiempos de preparación requeridos para cada trabajo.
- Seleccione arbitrariamente un trabajo A como trabajo inicial, una vez modificada la matriz con base al trabajo escogido como inicial, asignar un valor $St_{ii} = \infty$ a la diagonal de la matriz. Esto restringe la posibilidad que un trabajo se preceda así mismo.
- Observe el renglón correspondiente al primer trabajo A y seleccione el trabajo con menor tiempo de preparación. Esta solución establece la primera secuencia.
- Repita el procedimiento descrito en el numeral 3 hasta que $i > n$. Verifique que el trabajo seleccionado no esté en la secuencia.
- Calcula el lapso para la secuencia obtenida y compárelo con las restricciones que se tienen para la solución del problema.

3.7.7.2 Algoritmo basado en el arrepentimiento. Es un algoritmo de ramificación y acotamiento que utiliza el “arrepentimiento” para tomar decisiones y calcular costos, fue propuesto por Little et al, en 1963.

El procedimiento para su desarrollo es el siguiente:

- Elaborar una matriz de $n \times n$ para registrar los datos del problema.. Para evitar la posibilidad de que un trabajo se preceda así mismo se hace $St_{ii} = \infty$. Cualquier secuencia debe incluir los “n” trabajos y si es un ciclo contener al menos “n” elementos de la matriz. El lapso debe ser tan grande como el elemento “n” más pequeño. Por lo tanto, para que sea factible cada trabajo debe de estar incluido una vez, es decir, debe existir un elemento en cada renglón. Para iniciar haga $C_{si} = 0$ y $L = 1$, donde L es un contador.
- Se hace una reducción por renglones, a cada elemento del renglón o fila se le resta el elemento mas pequeño del renglón, llamado coeficiente de reducción. Esto generará un cero en la fila. El coeficiente de reducción del renglón es el valor que se agrega en la columna de datos del lapso C_i de la matriz resultante de la reducción.
- Si cada columna de la matriz posee un cero, no es necesario reducir por columnas, en caso contrario se debe realizar esta operación. El

coeficiente de reducción de la columna es el valor que se agrega en la fila de datos del lapso C_i de la matriz resultante de la reducción.

- Se calcula el arrepentimiento.

Para calcular el arrepentimiento se utiliza el siguiente algoritmo.

$$R_{i^* j^*} = \underset{j \neq j^*}{\text{Mín}} St_{i^* j^*} (fila) + \underset{i \neq i^*}{\text{Mín}} St_{i^* j^*} (columna)$$

Siendo:

$St_{i^* j^*}$: posición que corresponde a un cero, o sea $St_{i^* j^*} = 0$

$\underset{j \neq j^*}{\text{Mín}} St_{i^* j^*}$: valor mínimo encontrado en la fila sin incluir $St_{i^* j^*}$.

$\underset{i \neq i^*}{\text{Mín}} St_{i^* j^*}$: valor mínimo encontrado en la columna sin incluir $St_{i^* j^*}$.

Se repite este procedimiento para todos los ceros que se encuentran en las respectivas filas que constituyen la matriz. El valor calculado como arrepentimiento se coloca entre corchetes al lado del cero respectivo.

- Se selecciona el mayor arrepentimiento. Este valor establece la secuencia $i^* = n_i$ y $j^* = n_j$, siendo n_i y n_j los trabajos a realizar. Aquí el trabajo n_j sigue al trabajo n_i . Luego, se calcula el lapso como:

$$C_{si} = C_{fij} + R_{i^* j^*} + C_{cij}$$

Siendo:

C_{fij} : sumatoria de los coeficientes de reducción de cada renglón o fila en la matriz resultante de la reducción por filas. Para $i = 1, n$ $j =$ constante.

$R_{i^* j^*}$: arrepentimiento máximo correspondiente a la posición $St_{i^* j^*}$.

C_{cij} : sumatoria de los coeficientes de reducción de cada columna en la matriz resultante de la reducción por columnas. Si no realizó reducción por columnas, $C_{cij} = 0$. Para $j = 1, n$ $i =$ constante.

k : número de reducciones por filas

m : número de reducciones por columnas

C_{si} : lapso de la secuencia

C_{si+1} : lapso de la secuencia que precede a C_{si} .



- Incremente el contador a $L_i = 1 + i$, donde $i = 1, n$. Si $L_i \leq n$, se elimina el renglón i^* y la columna j^* de la matriz $n \times n$, resultando una matriz $(n-1) \times (n-1)$, se restringe la secuencia $St_{i=j^*, j=i^*} = \infty$ y se regresa al paso 2. En caso contrario, el proceso se detiene porque la secuencia esta completa.

- Cálculo del lapso para cada secuencia.

Si n_j sigue a n_i , entonces,

$$C_{si} = C_{fij} + C_{cij}$$

Si n_j no sigue a n_i , nodo prohibido, entonces

$$C_{sin} = C_{si} + R_{i^*j^*}$$

Si n_j sigue a n_i y n_{j+1} no sigue a n_{i+1} , entonces,

$$C_s = C_{sis} + R_{i^*j^*}$$

Siendo $R_{i^*j^*}$: arrepentimiento correspondiente a la secuencia $L = 1 + i$, $i = 1 \dots n$

1. Calcular C_{sin}, C_{sis}, C_s , para cada secuencia y ordenarlos. Modelar dichos valores en orden ascendente. El valor más pequeño establece la primera secuencia, el mayor en su orden, establece la siguiente secuencia y así sucesivamente hasta secuenciar los “n” trabajos. Verificar que para la secuencia precedente se cumpla, que

$$S_{i,j=k} \longrightarrow S_{i=k,j}$$

La condición anterior $j = k, i = k$ no siempre es cierta.

2. Establecer las secuencias finales.

3.7.7.3 Algoritmo de ramificación y acotamiento. En este método se utiliza el algoritmo de arrepentimiento para determinar los nodos, cada asignación de nodos, secuencia i,j , es un nivel en el árbol de ramas y cotas, cada cota en el nodo i,j es la suma de las reducciones y la cota sobre nodo alternativo¹ $i-j$, es decir, $i = j$ y $j = i$, es la suma de las reducciones más el arrepentimiento por no hacer la asignación $i-j$. La figura 3.1 es la representación del algoritmo de ramificación y acotamiento.

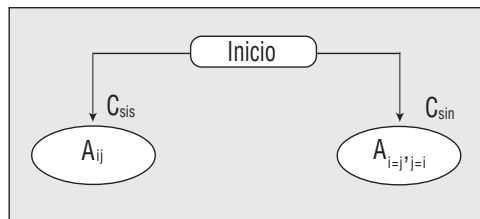
¹ El nodo alternativo se obtiene prohibiendo la asignación o nodo $i = j, j = i$, el cual se designa como $i-j$





3.7.8 Métodos de búsqueda de una sola máquina. Se utilizan para la solución de una gran variedad de problemas de optimización, incluyendo optimización no lineal y combinatoria. Algunos de los métodos son los enfoques de búsqueda en la vecindad, simulación de recocido, búsqueda tabú, algoritmos genéticos y redes neuronales.

Figura 3.1 Representación esquemática del algoritmo de ramificación y acotamiento.
 A_{ij} :nodo del árbol, $A_{i=j^*j=i}$: nodo prohibido, C_{sis} : Lapsos cuando se sigue la secuencia ij,
 C_{sin} : lapsos para el nodo prohibido.



3.7.8.1 Búsqueda en la vecindad Este método de búsqueda utiliza un programa inicial llamado semilla, por ejemplo, el de la fecha de entrega más cercana FEC, luego, se generan programas cercanos a la semilla llamados vecinos. De estos se selecciona el mejor como la nueva semilla. El proceso se repite hasta que no se encuentre un vecino mejor. Cuando esto sucede, se da por terminado el procedimiento.

Se puede utilizar cualquier heurístico para obtener una secuencia inicial. La vecindad más sencilla se define por el intercambio adyacente de pares IAP, se intercambian dos trabajos adyacentes i y j , en la secuencia. Por ejemplo para la secuencia inicial 1-2-3-4-5-6-7, aplicando el IAP se obtiene 1-2-3-5-4-6-7.

El intercambio de pares IP define una vecindad diferente, ya que no requiere intercambiar trabajos adyacentes. Por ejemplo, para la secuencia 1-2-3-4-5-6-7-8, aplicando IP, la nueva secuencia será 1-2-3-7-5-6-4-8. Otra manera de generar la vecindad es mediante la inserción de trabajos, INS, entre otros dos trabajos. Ejemplo: aplicando la INS a la secuencia 1-2-3-4-5-6 se tiene 1-2-6-4-5-3, se insertó el trabajo 6 entre los trabajos 2 y 4.

Una estrategia para determinar una nueva semilla es evaluar el costo de todos los vecinos y solucionar el que tenga menor costo como la nueva semilla. Cuando hay dificultad para seleccionar la nueva semilla, una buena estrategia podría ser tomar como la nueva semilla el primer vecino que se encuen-





tre con un costo más bajo, por ejemplo, uno que sea al menos 10% mejor. Si no hay vecinos adecuados, el problema de optimización finaliza.

El procedimiento para desarrollar este heurístico es el siguiente:

1. Utilizar cualquier heurístico para obtener la secuencia inicial, por ejemplo, el heurístico de la fecha de entrega más cercana FEC. A esta secuencia se le identifica como S.
2. Determinar las características para evaluar e identificar la nueva semilla, esta puede ser el costo total C^* , la tardanza T^* , etc.
3. Establecer el procedimiento por utilizar, es decir, el intercambio adyacente de pares IAP, intercambio de pares IP, de inserción INS.
4. Determinar la secuencia S y la tardanza T, asignar $i = 1$ y $j = 2$.
5. Intercambiar los trabajos en la posición i y j de la secuencia S. Esta nueva secuencia se designa como S^* y su tardanza T^* . Si $T^* < T$, la secuencia es la nueva semilla. Se va al numeral 7.
6. Incrementar $j = j + 1$ si $j > n$ el proceso finaliza y S^* es una secuencia óptima local. De lo contrario, $i = i + 1$ y se repite el numeral 5.
7. Sustituya S^* en lugar de S y T por T^* . haga $i = 1$ y $j = 2$ se va al numeral 5.
8. Presente los resultados en una tabla como la que se indica:

Trabajos		Secuencia inicial S	Tardanza
i	j	1-2-3-----n	
		Secuencia S^*	Tardanza*
1	2		
2	3		
3	n-1		
n-1	n		

9. Seleccione la mejor secuencia de acuerdo a los resultados de la tabla.

3.7.8.2 Simulación de recocido. Este método de optimización proporciona mejores resultados que los obtenidos por el procedimiento de búsqueda en la vecindad. Debido a que existen varios métodos, se utilizará el algoritmo propuesto por Johnson et al, en 1989, para ilustrar el uso del heurístico.



Definiciones:

- C^* : costo de la mejor secuencia encontrada, denomina la incertidumbre.
- C : costo de la secuencia semilla.
- C^1 : costo de la vecindad que se examina.
- T : temperatura inicial, $T > 0$.
- R : factor de enfriamiento, $0 < R < 1$.
- Δ : diferencia en costo entre un vecino y la semilla.
- K : número de iteraciones.

Para desarrollar el heurístico se presenta el siguiente procedimiento:

1. Determine una secuencia semilla con cualquiera de los métodos analizados en los numerales anteriores, identifíquela con la letra S y calcule su costo C , donde C es la tardanza total de S . Establezca la secuencia incumbente como la secuencia actual, o sea $S^* = S$, y su costo a $C^* = C$. Haga $i = 1$, $j = 2$ y $k = 1$.
2. Intercambie los trabajos en las posiciones i y j de la secuencia S para generar la secuencia vecina S^1 , calcular $\Delta = C^1 - C$, donde C es la tardanza de la secuencia S^1 . Elija un valor q entre 0 y 1. Si $q < e^{-\Delta/T}$ se va al numeral 4.
3. Incrementar j , $j = j + 1$ y regrese al numeral 5, de lo contrario, $i = i + 1$ y vuelva al numeral 2.
4. Sustituir S^1 en lugar de S , $C = C^1$, si $C < C^*$, entonces $C^* = C$, reemplazar S^* por S . Hacer $k = 1$, $i = 1$, $j = 2$ y repetir el paso 2.
5. Reducir la temperatura sustituyendo T por $R \times T$, y aumentar k , $k = k + 1$. Si $k > K$ el proceso se detiene y S^* es la secuencia de menor costo. En caso contrario, regresar al numeral 2.

Consideraciones acerca del algoritmo de simulación de recocido.

- Si $\Delta < 0$, el vecino es una mejora y se puede convertir en una nueva semilla.
- Si $\Delta > 0$, el vecino puede sustituir a la semilla, pero existe la probabilidad de que esta solución sea pobre.
- Si Δ es negativa, conviene moverse, pero entre más grande sea Δ , menos atractivo será cambiar de semilla.



- Si $q < e^{-\Delta/T}$, el vecino sustituye a la semilla.
- Después de cada pasada completa por el conjunto de trabajos, se disminuye la temperatura.
- Cuando se ha realizado el procedimiento K pasadas consecutivas por el conjunto de trabajos sin mejorar el costo, se dice que el proceso está congelado.

3.8 Programación de “n” trabajos en “m” máquinas

Algunos talleres poseen varias máquinas para procesar los trabajos; generalmente de cierta complejidad, que reciben durante el día. Si se tienen n trabajos para procesar en “m” máquinas y todos los trabajos pueden procesarse en todas las máquinas, entonces hay $(n!)^m$ probabilidades para programarlos. Para hacer más factible la programación de trabajos en las diferentes máquinas, D. Sipper y Robert Bulfin Junior, consideran las máquinas en dos disposiciones: en paralelo y en serie.

3.8.1 Máquinas en paralelo. Cuando se utiliza esta disposición, se entiende que cualquier trabajo se puede procesar en cualquiera de las máquinas y que el tiempo de proceso es igual en cualquiera de ellas, porque son máquinas idénticas. Aunque la solución óptima es difícil de obtener, una alternativa es la elaboración de una lista programa utilizando algunos de los heurísticos analizados en los numerales anteriores, tales como tiempo de flujo mínimo TPC, tiempo de flujo ponderado, número de trabajos tardíos, tiempo de flujo mínimo sin trabajadores tardíos FEC, entre otros.

3.8.1.1 Algoritmo para minimizar el tiempo de flujo.

Para desarrollar la programación en paralelo, se sugiere el procedimiento siguiente:

1. Introduzca los trabajos a programar con su respectivo tiempo de proceso.
2. Elabore una lista programa utilizando el algoritmo de la secuencia de tiempo de proceso más corto TPC.
3. Construya una tabla donde resuma los resultados obtenidos de la aplicación del algoritmo empleado.



4. Definición de variables.

$H_{j,k}$: carga asignada a cada máquina. $j = 1, m$ siendo “m” el número de máquinas en paralelo.

C_k : lapso, $k = 1, n$; $n =$ número de trabajos.

L_k : elementos que constituyen la lista programa.

P_k : tiempo de procesamiento en unidades de tiempo de cada elemento de la lista de programa L_k .

5. Haga $J = 0$, $K = 0$, $h = 0$, $H_{1,0} = 0$.

6. Haga $J = J + 1$ para seleccionar maquina, $K = 1, n$.

Calcular $H_{j,k} = H_{j,k-1} + P_k$, Haga $C_k = H_{j,k}$.

Mostrar K , L_k , P_k , C_k , $H_{j,k}$.

7. Si $J < m$ y $k < n$, repita numeral 6.

8. Si $J > m$ y $k < n$ haga $K = K + 1$, repita numeral 6.

9. Si $J < m$ y $k > n$, el proceso termina.

3.8.1.2 Algoritmo para minimizar el lapso de producción. Para este caso, la lista programa se construye utilizando el algoritmo de tiempo de proceso mas largo TPL y el siguiente trabajo en la lista se asigna la máquina con el menor tiempo de proceso total asignado. Para el desarrollo del algoritmo se siguen los pasos siguientes.

1. Introduzca los trabajos a programar con su respectivo tiempo de proceso.
2. Elabore una lista programa utilizando el algoritmo de tiempo de procesado más largo TPL.
3. Construya una tabla donde resuma los resultados obtenidos de la aplicación del algoritmo empleado.
4. Definición de variables.

$H_{j,k}$: carga asignada a cada máquina. $j = 1, m$ siendo “m” el número de máquinas en paralelo.

C_k : lapso, $k = 1, n$; $n =$ número de trabajos.



L_k : elementos que constituyen la lista programa. $k = 1, n$

P_k : tiempo de procesamiento en unidades de tiempo de cada elemento de la lista de programa L_k .

5. Haga $J = 0$, $K = 1$, $k = 0$, $H_{1,0} = 0$.
6. Haga $J = J + 1$ para seleccionar máquina, $k = 1, n$
Calcular $H_{j,k} = H_{j,k-1} + P_k$, $C_k = H_{j,k}$.
Mostrar K , L_k , P_k , C_k , $H_{j,k}$.
7. Si $J < m$ y $k < n$ repita numeral 6, si $J < m$ y $k > n$ el proceso termina.
8. Si $J > m$ y $k < n$ haga $K = K + 1$.
9. Determinar la máquina que posee la menor carga $H_{j,k}$ y asignarle el siguiente trabajo. Haga $j^* = j$, $K = K + 1$. Si $j^* = m$ se va al paso 10. Si $j^* = 1$ se va al paso 12.
10. Haga $k = k + 1$
Calcular $H_{j^*,k} = H_{j^*,k-1} + P_k$, $C_k = H_{j^*,k}$.
Mostrar K , L_k , P_k , C_k , $H_{j^*,k}$.
11. Si $j^* \leq m$ y $k < n$
Entonces $j^* = j^* - 1$, repita paso 10
Si $j^* = 0$ y $k < n$, entonces, repita paso 9.
Si $j^* = 0$ y $k > n$, el proceso termina.
12. Haga $k = k + 1$.
Calcular $H_{j^*,k} = H_{j^*,k-1} + P_k$, $C_k = H_{j^*,k}$.
Mostrar K , L_k , P_k , C_k , $H_{j^*,k}$
Si $j^* \leq m$ y $k < n$.
Entonces $j^* = j^* + 1$, repita paso 12
13. Si $j^* > m$ y $k < n$, se va al paso 9
Si $j^* > m$ y $k > n$, el proceso termina.
14. Si en algún momento se encuentran valores de $H_{j^*,k}$ iguales, se escogerá el siguiente que corresponda a la secuencia.

3.8.2 Máquinas en serie. Esta disposición de procesadores corresponde a la denominada producción continua, en la cual, todos los trabajos se procesan en el mismo orden. Es decir, que al terminar el trabajo específico de cada operación, la parte pasa a la siguiente etapa sin esperar a terminar todo el trabajo en el lote. Para que el trabajo fluya libremente, los tiempos de cada operación deben ser de igual longitud y no aparecer disturbios en la línea de producción.

3.8.2.1 Algoritmo de Johnson. El algoritmo de Johnson minimiza el lapso, lo que es equivalente a reducir el tiempo ocioso de la máquina. En general, este algoritmo siempre genera un programa óptimo. El tiempo de inicio de cada trabajo en cada procesador es el tiempo de terminación menos el tiempo de procesado. El procedimiento para la solución del algoritmo es:

1. Definición de variables.

J_k : posición del trabajo mas cercano posible, K : contador creciente.

J_l : posición del trabajo mas lejano posible, L : contador descendiente.

L^* : trabajo programado.

H_j : tiempo de terminación del último trabajo programado en la máquina j .

C_j : tiempo de terminación del trabajo i en la máquina j .

2. Definir el conjunto de trabajos a programar. $U = \{1, 2, 3, \dots, n\}$

Hacer $k = 1, l = n, j_i = 0, i = 1, 2, 3, \dots, n$.

3. Si el conjunto no tiene elementos $U \{f\}$, se va a numeral 6.

De otra manera, calcular:

$p_{ij} = \min \{ \min p_{i1}, \min p_{i2} \}; i = 1, n, i = 1, n.$

Una vez calculado el p_{ij} mínimo, haga $i^* = i$ y $j^* = j$.

Si $j^* = 1$, se va al numeral 4.

Si $j^* = 2$, se va al numeral 5.

4. Programar el trabajo i^* en la posición más cercana disponible (k) de la secuencia, actualizar k y eliminar el trabajo programado del conjunto programable. Se hace $J_k = i^*, k = k + 1$ y $U = U - \{i^*\}$. Ir al numeral 3.



5. Programar el trabajo i^* en la posición más lejana posible (l), actualizar l , eliminar el trabajo programado del conjunto programable. Hacer $J_1 = L^*$, $L = L - 1$ y $U = U - \{i^*\}$, se va al numeral 3.
6. El proceso termina, la secuencia de trabajo corresponde a j_i con J_1 como el primer trabajo, J_l como el último trabajo y J_{k+1} , J_{l-1} , como trabajos intermedios.



BIBLIOGRAFÍA

BELLO, Carlos. Manual de producción aplicado a las pequeñas y medianas empresas. Ecoediciones . Santa Fè de Bogotá 2002. 90 p.

BID – ICESI. Gestión de innovación y la tecnología. Programa de Capacitación Gerencial y Desarrollo Sostenible para Pyme de América latina. 50 p.

BOOTHROYD, Geoffrey. Fundamentos del corte de metales y de las máquinas herramienta. Mc Graw- Hill. 1978. 220 p.

CASTAÑEDA, Jesús David. Desarrollo e implementación de líneas estratégicas de competitividad y productividad para las Pyme metalmecánicas de la Zona Pacifico. Corporación Universitaria Autónoma de Occidente. Santiago de Cali. Noviembre 2002. 30 p.

COLCIENCIAS. Políticas para el Desarrollo Empresarial. Seminario sobre tecnologías de Manufactura Flexible. Programa Regional de Automatización Industrial del sector de Bienes de Capital de América latina. Santa Fè de Bogotá. Febrero 1992. 80 p.

COLCIENCIAS. Plan Estratégico del Programa Nacional de Desarrollo Tecnológico Industrial y Calidad. 2000 – 2010. Sistema Nacional de Innovación, Ministerio de Desarrollo Económico, Ministerio de Comercio Exterior, Departamento de Planeación Nacional, Servicio Nacional de Aprendizaje Sena. Bogotá D.C. Colombia Noviembre 2000. 50 p.

CURTIS, Mark. Planeación de procesos. Colección Microempresa serie la calidad total. Limusa Noriega Editores. México 1996. 120 p.

D’ALESSIO, Fernando. Administración y dirección de la producción: Enfoque estratégico y de calidad. Prentice Hall. Colombia. 2002. 520 p.

DUQUE, W., CASTAÑEDA, J.D. Sistemas integrados de manufactura, texto Académico . Corporación Universitaria Autónoma de Occidente. Enero 2002. 150 p.

EILON, S. Temas empresariales: La producción, organización y control, Editorial Labor, 1980. 150 p.

EVANS, J. R. Production/operations management, quality, performance and value: Operations scheduling and production-activity control, West Publishing Company, Fifth edition. 593 p.

GARCÍA DE JALÓN, J., RODRÍGUEZ, J., BRAZALES, A. Aprenda visual Basic 6.0. como si estuviera en primero. Escuela Superior de Ingenieros Industriales de San Sebastián. Universidad de Navarra. San Sebastián. 100 p.

GERLING, Heinrich. Alrededor de las máquinas herramienta. Editorial Reverte, S.A. Barcelona 1964. 150 p.

GONZÁLEZ, Carlos, ZELENY, Ramón. Metrología. Mc Graw – Hill. Mexico. 1995. 200 p.

HEIZER, Jay, RENDER, Barry. Production & operations management. Prentice Hall. Fourth Edition. 1996. 350 p.



KALPAKJIAN, Serope., SCHMID, Steven. Manufactura, ingeniería y tecnología. Pearson Education. Cuarta Edición. México 2002. 850 p.

KAZMIER, Leonard, DIAZ, Alfredo. Estadística aplicada a la administración y economía. McGraw Hill. Segunda Edición. México. 1991. 100 p.

KIBBE, Richard y Otros. Manual de máquina herramienta. Volumen I y II. Limusa México 1985. 1100 p.

KOREN, Yoram. Computer control of manufacturing systems. Mc Graw – Hill International Edition. 120 p.

KRAR, O. y Otros. Operaciones de máquinas herramienta. Mc Graw – Hill México 1985. 1200 p.

LOCKYER, K., La Producción industrial. Su administración: Tipos de producción, tecnología de grupos, control de producción, programación y carga, Alfa Omega. 266 p.

MARIÑO, Hernando. Gerencia de procesos. Cuarta impresión. Alfaomega Grupo Editor S. A. de C. V. Colombia. 2003. 70 p.

NANUA, Singh. Systems approach to computer integrated design and manufacturing. John Wiley & Sons. 1996. 643 p.

PYZDEK, Thomas, BERGER, Roger. Manual de control de Calidad. McGraw Hill. 1996. 320 p

RIGGS, J. L. Sistemas de producción, planeación, análisis y control: máquinas y mantenimiento, Limusa, Tercera edición. 676 p.

SCHEY, John. Procesos de manufactura. Mc Graw – Hill. Tercera Edición. 2000. 523 p.

SIPPER, D., BULFIN, R. Planeación y control de la producción: programación de operaciones, Mc Graw Hill, Primera edición en español, México, 1999. 652 p.

SOSA PULIDO, Demetrio. Conceptos y herramientas para la mejora continua. Limusa Noriega Editores. México. 2002. 150 p.

SULE, D. R. Instalaciones de manufactura. Thomanson Learning. Segunda Edición. México 2001. 380 p.

TORRES, J. H. Elementos de producción: planeación programación y control, Universidad Católica de Colombia, Facultad de Ingeniería Industrial. 380 p.

VOLLMAN, T. et all. Sistemas de planificación y control de la fabricación: Conceptos avanzados de programación, McGraw Hill/Irwin, Tercera edición. 456 p.