



PROGRAMACIÓN DE LA PRODUCCIÓN

ISBN:978-9942-9936-3-2



Alberto Medina León.

- Doctor en Ciencias Técnicas (UCLV/1992).
- Máster en Gestión Turística (Universidad de las Palmas/2001) y en Ciencias de la Educación (UMCC/2010).
- Profesor Titular de la UMCC (2006).
- Miembro del Tribunal Nacional Permanente de Cuba para Ingeniería Industrial (2001).
- Vicepresidente (2008). Coordinador de la mención de Producción y Servicios de la Maestría de Administración de Empresas de la UMCC.



Dianelys Nogueira Rivera

- Doctora en Ciencias Técnicas (2002).
- Máster en Gestión de la Producción (1998).
- Profesora Titular de la Universidad de Matanzas "Camilo Cienfuegos" (UMCC).
- Coordinadora del doctorado curricular colaborativo en Ingeniería Industrial en la UMCC (2010).
- Miembro del Tribunal Nacional Permanente de Cuba para Ingeniería Industrial (2004).



Marcos Oviedo Rodríguez.

- Magister en Administración de Empresas (2008).
- Ingeniero Comercial (1987).
- Contador Público Auditor (2001).
- Profesor Contratado Facultad de Ciencias de la Educación UTB (1988).
- Profesor Titular Facultad de Administración, Finanzas e Informática UTB (2000).
- Profesor Invitado Centro de Postgrado UTB (2007).
- Director del Centro de Postgrado UTB (2004).
- Director de la Escuela de Administración de Empresas y Gestión Empresarial (2004).
- Jefe del Departamento de Control de Bienes UTB (2005).
- Director de Evaluación y Acreditación UTB (2007).
- Director de Planificación UTB (2009).
- Subdecano de la Facultad de Administración, Finanzas e Informática UTB (2012).
- Cursa el Doctorado en Ciencias Técnicas en la UMCC (2011).



Arialys Hernández Nariño.

- Doctora en Ciencias Técnicas (2010)
- Máster en Gestión de la Producción (1996) e Ingeniería Industrial (2013) de la UMCC.
- Master en Turismo de Salud en Irlanda (1998).
- Profesora Titular de la Universidad de Matanzas "Camilo Cienfuegos" (UMCC).
- Jefe de la Disciplina de Gestión de la Producción.

ÍNDICE

PRÓLOGO	3
INTRODUCCIÓN	7
Tema 1. Consideraciones iniciales de la Programación de la Producción	9
1.1. Aspectos generales	10
1.2. Planeación a largo plazo	12
1.3. Planeación agregada	14
1.4. Sistemas para realizar la producción	18
1.5. La naturaleza e importancia de los centros de trabajo	18
1.6. Ejecución y control de la producción	23
1.7. Funciones típicas de la programación y el control	25
1.8. Objetivos de la programación del centro de trabajo.	27
1.9. Control de insumos/productos.	28
1.10. Principios de la programación del centro de trabajo	29
1.11. Programación del personal en los servicios	30
1.11.1. Programar días libres consecutivos	30
1.11.2. Programar horarios diarios de trabajo	33
1.11.3. Programar horarios de trabajo por horas	36
1.12. Representación gráfica	38
1.12.1. Gráfica de Gantt	38
1.12.2. Principales ventajas del gráfico de Gantt	39
1.13. Preguntas de autocontrol.	42
Tema 2. La asignación como función dentro de la Programación de la Producción	52
2.1. Elementos generales de la Asignación	53
2.2. Método de Transporte	54
2.2.1. Características del modelo de transporte.	57
2.2.2 Solución por el método de transporte	59
2.2.3 Problema desbalanceado de transporte	62
2.2.4 Búsqueda de una solución básica factible inicial	

al problema de transporte	65
2.2.4.1 Método de la Esquina del Noroeste	66
2.2.4.2 Método de la matriz mínima de costos o costo mínimo de la matriz	69
2.2.4.3 Método del costo mínimo de la fila	74
2.2.4.4 Método del costo mínimo de la columna	78
2.2.4.5 Método de aproximación de Vogel	82
2.2.5 Búsqueda de la solución óptima en el problema de transporte	87
2.2.5.1 Método “SALTANDO SOBRE PIEDRAS” (STEPPING STONE)	87
2.2.5.2 Método Simplex o MODI	92
2.2.6 Complicaciones al modelo de transporte y su solución.	95
2.2.6.1 Maximizar.	95
2.2.6.2 Solución óptima múltiple.	96
2.2.6.3 Solución degenerada.	97
2.2.7 Ejercicio Resuelto.	99
2.2.8 Problemas propuestos para solución.	108
2.3. Método de los Índices	115
2.4. Preguntas de autocontrol	122
2.5. Problemas propuestos	122
2.6. Método Húngaro	129
2.6.1. Procedimiento del Método Húngaro.	135
2.6.2. Preguntas de autocontrol de asignación	136
2.6.3. Ejercicio resuelto # uno, para la comprensión del método Húngaro.	136
2.6.4. Ejercicio resuelto # dos.	138
2.7. Problemas propuestos	143
Tema 3. La secuenciación como función dentro de la Programación de la Producción.	148
3.1. Secuencia de las tareas.	149
3.2. Sistemas de prioridades.	149
3.3. Reglas de prioridad para el despacho de los	

trabajos.	149
3.4. Comparación de las reglas de prioridad.	160
3.5. Programar n trabajos en una máquina.	162
3.5.1. Ejemplo 1.	163
3.5.2. Ejemplo 2.	167
3.5.2. Ejemplo 3.	174
3.6 Selección de la mejor secuencia.	177
3.6.1. Pasos a seguir para la determinación del TLP.	177
3.6.2. Ejemplo 1.	178
3.7 Métodos de secuenciación para programas ordenados.	179
3.7.1 Método de Johnson (para 2 máquinas y n trabajos).	180
3.7.2. Método de Johnson Modificado (para 3 puestos de trabajo y n trabajos).	184
3.7.3 Método de Campbell – Dudek – Smith (C.D.S) (para n trabajos y m puestos de trabajo).	187
3.7.3.1. Ejemplo.	188
3.7.4 Método de valoración de trabajo (V_{ti})	191
3.7.5 Métodos exactos de solución	193
3.7.6 Ejercicios integrador.	198
3.8. Preguntas de autocontrol de secuenciación	203
Tema 4. La Temporización como función dentro de la Programación de la Producción.	204
4.1. Aspectos generales de la temporización	205
4.1.1 Aplicación del método del gráfico de Gantt	205
4.1.2 Aplicación de la teoría de las redes	207
4.1.3 Aplicación del Método Tabular	213
4.2 Preguntas de autocontrol de temporización.	217
4.3 Problemas propuestos de secuenciación y temporización.	217
BIBLIOGRAFÍA	228

Programación de la producción



Programación de la producción

Autores:

Dr. C. Alberto Medina León.
Dra. C. Dianelys Nogueira Rivera.
MAE. Marcos Oviedo Rodríguez.
Dra. C. Arialys Hernández Nariño.

Autores asociados a los capítulos:

MSc. Daylín Medina Nogueira
Dr. C. Arturo Bofill Placeres.
Ing. Ariadna García Romero.
Ing. Annaray Paz Márquez.
ATD. Lixandra Alonso Gámez.
MSc. Dinora Carpio Vera.
MSc. Josue Oviedo Rodríguez.

ISBN: 978-9942-9936-3-2

Agosto de 2014

Impresión: Imprenta Malena
Babahoyo – Los Ríos – Ecuador
Tiraje: 800 Ejemplares.

Programación de la producción / Dr. C. Alberto Medina León / Dra. C. Dianelys Nogueira Rivera / MAE. Marcos Oviedo Rodríguez y Dra. C. Arialys Hernández Nariño. Babahoyo. Ecuador. Editorial, los autores.
Año 2014.
245; 17 x 25
ISBN: 978-9942-9936-3-2
1.- Administración. 2.- Programación por procesos.

Auspiciantes:

- Universidad Técnica de Babahoyo.
- Casa de la Cultura Ecuatoriana – Nucleo Los Ríos.
- Asociación de Profesores de la UTB.

Prohibida la reproducción total o parcial de este libro, por cualquier medio, sin permiso escrito de los autores.

PRÓLOGO

Dos de los conceptos fundamentales sobre el que gira el presente texto, aparecen precisamente en el nombre dado al mismo, esto es el de “Programación”, tomando como base lo que es “Programar”, que no es otra cosa que idear y ordenar las acciones necesarias para realizar un proyecto o la de “Preparar ciertas máquinas por anticipado para que empiecen a funcionar en el momento previsto”, el otro evento es el de la “Producción”, esto es el proceso de cómo se fabrican los bienes o servicios que una empresa genera para poder mantenerse en el medio, ambos eventos unidos permiten que una compañía conozca a ciencia cierta cómo se deben programar y producir de manera más eficiente y eficaz los bienes que comercializa, permitiendo con ello una generación de utilidades para sus partícipes y una optimización de los pasos que conlleva la fabricación de sus bienes o servicios.

El enfoque general del presente texto se presenta en cuatro temas fundamentales dentro del contexto programar – producir, lo que se estima como un importante aporte adicional a las diferentes opiniones que al respecto se han desplegado, pero que, como tal el presente texto presenta la opinión del colectivo de autores que han trabajado a fin de entregar una actualización sobre este nexo que se mantiene al interior de las organizaciones, importantes por su vínculo final en la generación de las utilidades de las empresas y el manejo óptimo de sus procesos productivos.

En el tema 1, se plantean las consideraciones iniciales de la Programación de la Producción, en el mismo se presentan contextualizaciones sobre la planificación estratégica o a largo plazo, la planificación agregada o a medio plazo, la programación maestra, la programación de componentes y la

ejecución y control, se realiza una comparación entre algunos métodos de planificación agregada, se señala los objetivos y principios de la programación del centro de trabajo, además de como programar horarios de trabajo, entre otros aspectos que fortalecen el objetivo del texto.

El tema 2, se enfoca a la asignación como función dentro de la Programación de la Producción, en la misma se revisan aspectos sobre la aplicación del Método de Transporte en la función de asignación, como debe obtenerse una Solución Básica Factible Inicial (SBFI), usando los métodos de: la Esquina del Noroeste; Costo Mínimo de la Matriz; Costo Mínimo de la Fila; Costo Mínimo de la Columna y el Vogels. Como medios de verificación para determinar si la solución es óptima, se aplican los Método de Stepping – Stone (Saltando sobre piedras) y del Método MODI (variables duales).

En este tema se hace una importante aportación sobre el “Método Húngaro”, el cual posee múltiples aplicaciones desde el punto de vista de la asignación, entre ellas se encuentran: la asignación de tareas a puestos de trabajos o máquinas, la ubicación espacial de máquinas y/o puestos de trabajo bajo la estructura de puestos de trabajo individuales y la ubicación de materiales en almacenes.

Seguidamente el tema 3, denominado: “La secuenciación como función dentro de la Programación de la Producción”, encontraremos la secuencia de las tareas que se realizan en una organización, consistiendo en el proceso para establecer cuál tarea se realizará primero en una máquina o en un centro de trabajo cualquiera se conoce como establecer la secuencia o el orden de prioridad. Se presenta una lista con las reglas heurísticas más usadas para fijar el orden de los trabajos, así como la nomenclatura a que se hará referencia:

Es importante la tabla en la que se recoge los criterios de las reglas estáticas, opiniones establecidas por el colectivo de autores entre los que se identifican a Narasihman (1996); Chase, et al. (2007); Adenso Díaz. (1993); Fundora Miranda, A (1987); Krajewski & Ritzman. 2008); Schroeder (1992).

Se presenta una aplicación de ejercicios sobre las reglas dinámicas, que según Díaz A. (1993) analiza las FCFS, SOT, DDATE, LCFS, ALEATORIO, STR, considerando que es la regla SOT la que produce una solución óptima por lo que de hecho, esta simple regla es tan potente que ha sido llamada " el concepto más importante para el tema de secuenciado".

Finalmente en el tema 4, denominado "La Temporización como función dentro de la Programación de la Producción", se analizan tres variantes para el cálculo de la temporización como tal, entre ellos podremos apreciar: La utilización de los gráficos de Gantt; la utilización de la teoría de las redes y la utilización del método tabular.

Al finalizar cada uno de los cuatro temas se plantean preguntas de análisis sobre lo tratado, se muestran varios ejercicios resueltos y se presentan problemas propuestos para que el lector los realice y de solución a los mismos.

Debe agregarse a lo expuesto en líneas anteriores, que el título del presente texto, es preciso y conciso; se destaca la esencia del contenido y las particularidades que se pretenden alcanzar, el enfoque sistémico resulta una necesidad en la solución de los problemas de gestión de la producción y deberá estar presente en cada una de las soluciones que como profesionales propongamos, por lo que considero que de ahí proviene la importancia modular de esta obra.

Finalmente es necesario señalar que el colectivo de autores se encuentra organizado por uno de nuestros convenios macro que mantiene la Universidad Técnica de Babahoyo (Ecuador), con la Universidad de Matanzas “Camilo Cienfuegos” (Cuba) para la producción de textos, investigaciones, conferencias, intercambio docente y estudiantil, este es el producto inicial de aquello.

**Ing. Com. Marcos Oviedo Rodríguez, MAE.
SUBDECANO DE LA FACULTAD DE
ADMINISTRACIÓN, FINANZA E INFORMÁTICA
UNIVERSIDAD TÉCNICA DE BABAHOYO**

INTRODUCCIÓN

Para muchos gerentes de empresas les resulta dificultoso establecer la realidad de su producción y conocer los costos que generan estas, así como el tiempo indispensable para cubrir un determinado lote o nivel de “Producción”, solo confían en los que su talento humano a cargo del área de producción indiquen en sus reportes, por eso es necesario avizorar las tendencias o retos que se enfrentan en cuanto a calidad, cantidad y tiempo de compromiso en la entrega de los pedidos formulados por sus clientes e ir comparando su sistema productivo con el de la competencia que agrupa el mercado.

Este aspecto de cumplimiento de los estándares de calidad, cantidad y tiempo, requieren de un factor de suma importancia al interior de las organizaciones, es decir como planificar o “programar” su proceso de producción, se hace necesario relacionar que la programación es la acción y efecto de programar. Refiriéndonos a la idea de ordenar las acciones que se realizarán en el marco de un sistema de fabricación; agregando a aquello la preparación de las máquinas para que cumplan con una tarea en un momento determinado y a la aplicación de métodos necesarios para obtener una solución en la cadena productiva.

Frente a este reto que deben asumir las organizaciones y quienes forman parte de los procesos o de la cadena que implica, se presenta esta obra, la misma que ha sido creada como material auxiliar para aquellos que quieran incursionar en la temática de “Programación de la Producción”.

El presente texto también ha sido diseñado para contribuir a la enseñanza académica de pregrado como de posgrado por su

estructura y la cantidad de temas que aborda, de fácil comprensión, con ejemplos didácticos y probados en la enseñanza y con otros para ser aplicados en el aula o área industrial o de servicio.

La contribución está en la compilación, en único material, de un amplio número de técnicas, herramientas y métodos que estudian esta función de la Administración de Operaciones, cuatro son los temas específicamente sobre los que gira el presente texto y que se analizan con profundidad, siendo estos:

- Consideraciones iniciales de la programación de la producción.
- La asignación como función dentro de la programación de la producción.
- La secuenciación como función dentro de la programación de la producción.
- La temporización como función dentro de la programación de la producción.

En la función de asignación, se incorpora el *método de los índices*, como novedad en el material; así como otros métodos que, aunque se emplean en otras disciplinas, se incluyen para brindar un abordaje completo al tema, tales como: *método de transporte*, en que se busca una Solución Básica Factible Inicial (SBFI) aplicando métodos adicionales para la obtención de la misma y el *método húngaro*, que posee múltiples aplicaciones desde el punto de vista de la asignación de tareas a puestos de trabajos, la ubicación espacial de máquinas, bajo la estructura de puestos de trabajo individuales y la ubicación de materiales en almacenes.

Los autores.

TEMA 1.

Consideraciones iniciales de la Programación de la Producción

Tema 1. Consideraciones iniciales de la Programación de la Producción

1.1. Aspectos generales

Son variados y similares los enfoques que con respecto al proceso de planificación, programación y control de la producción han sido tratados por diversos autores tales como Schroeder et al. (2011), Tawfik & Chauvel (1992), Nahmias (1997), Buffa & Sarin (1995), Meredith & Gibbs (1986) entre otros, quienes establecen, en términos generales, que este se inicia con las previsiones, de las cuales se desprenden los planes a largo, mediano y corto plazo. Este enfoque, a juicio del autor presenta algunas falencias, ya que carece del concepto integrador que en el sentido vertical, debe comenzar en la estrategia empresarial y que en el sentido horizontal, debe relacionarse con los demás subsistemas de la organización.

Otros autores como Starr, (1979), Companys Pascual, (1989), Chase & Aquilano, (2000) y Adam & Ebert (1991), ofrecen en sus obras modelos de gestión de la producción que, a pesar de establecer un concepto integrador en el sentido vertical, no expresan claramente la integración en el sentido horizontal. Tal vez son Vollmann et al. (1991) y Domínguez Machuca et al. (1995), quienes de acuerdo a la literatura consultada presentan un mejor enfoque, pues consideran la integración en ambos sentidos. Al respecto, este último autor afirma que, el proceso de planificación y control de la producción debe seguir un enfoque jerárquico, en el que se logre una integración vertical entre los objetivos estratégicos, tácticos y operativos y además se establezca su relación horizontal con las otras áreas funcionales de la compañía. Básicamente las cinco fases que

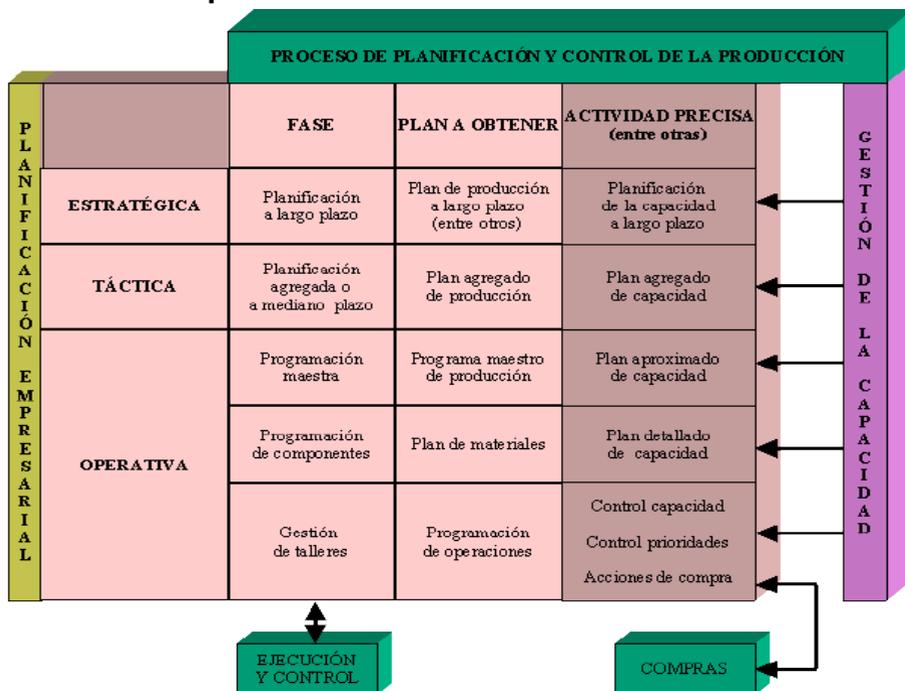
componen el proceso de planificación y control de la producción son Domínguez Machuca, (1995):

1. Planificación estratégica o a largo plazo.
2. Planificación agregada o a medio plazo.
3. Programación maestra.
4. Programación de componentes.
5. Ejecución y control.

Es importante anotar, que de acuerdo con Domínguez Machuca (1995), estas fases se deberán llevar a cabo en cualquier empresa manufacturera, independientemente de su tamaño y actividad, aunque la forma como estas se desarrollen, dependerá de las características propias de cada sistema productivo. La figura 1.1, resume las principales fases mencionadas junto con los planes que de ellos se derivan, se relaciona por un lado, los niveles de planificación empresarial y por otro la planificación y gestión de la capacidad.

Se tiene en cuenta los aspectos que se deben considerar en el proceso de planificación, programación y control de la producción y en aras de su importancia en las acciones de mejoramiento de la capacidad competitiva de una organización, a continuación se procederá a analizar de manera detallada los aportes de distintos autores en cuanto a conceptos, métodos y técnicas más empleadas en cada una de sus fases.

Figura 1.1. Proceso de planificación, programación y control de la producción.



Fuente: Domínguez Machuca José Antonio, 1995.

1.2. Planeación a largo plazo

Una de las necesidades expresas, en el camino para mejorar la competitividad, es la adopción de una correcta estrategia de operaciones, la cual es definida por Schroeder et al. (2011), como una visión de la función de operaciones que depende de la dirección o impulso generales para la toma de decisiones. Esta visión, se debe integrar con la estrategia empresarial y con frecuencia, aunque no siempre, se refleja en un plan formal.

La estrategia de operaciones debe dar como resultado un patrón consistente de toma de decisiones en las operaciones y una ventaja competitiva para la compañía. Así mismo, Chase

& Aquilano (1995), expresan, como aspecto importante a considerar, que dicha estrategia debe especificar la manera en que la empresa empleará sus capacidades productivas para apoyar la estrategia corporativa.

Todo esto significa, que la estrategia de operaciones debe surgir de una estrategia empresarial a largo plazo y a su vez, debe integrarse de manera horizontal con las estrategias de los demás subsistemas de la compañía.

De acuerdo con esta afirmación y en concordancia con Domínguez Machuca et al. (1995), la estrategia de operaciones se constituye como un plan a largo plazo para el subsistema de operaciones, en el que se recogen los objetivos a lograr y los cursos de acción, así como la asignación de recursos a los diferentes productos y funciones, ello debe perseguir el logro de los objetivos globales de la empresa en el marco de su estrategia corporativa, y constituye además un patrón consistente para el desarrollo de las decisiones tácticas y operativas del subsistema. Lo anterior, no difiere del concepto de Schroeder et al. (2011), quien agrega además que la estrategia de operaciones debe ser una estrategia funcional que debe guiarse por la estrategia empresarial y cuyo corazón debe estar constituido por la misión, la competencia distintiva, los objetivos y las políticas.

En consonancia con lo anterior, Domínguez Machuca et al. (1995) plantea, que las dos funciones básicas que ha de cumplir la estrategia de operaciones son:

- Servir como marco de referencia para la planificación y control de la producción, de la cual es su punto de partida.

- Marcar las pautas que permitan apreciar en qué medida el subsistema de operaciones se colabora, con el logro de la estrategia corporativa.

Dentro de este propósito, las decisiones básicas que deben ser contempladas dentro de la estrategia de operaciones son:

- Decisiones de posicionamiento, que afectan la dirección futura de la compañía y dentro de la cual se incluyen los objetivos a largo plazo, el establecimiento de las prioridades competitivas, la fijación del modelo de gestión de la calidad, la selección de productos y la selección de procesos.
- Decisiones de diseño, concernientes al subsistema de operaciones, que implican compromiso a largo plazo y entre las cuales se encuentran el diseño de productos y procesos, la mano de obra, la apropiación de nuevas tecnologías, decisiones de capacidad, localización y distribución de instalaciones y sistemas de aprovisionamiento.

1.3. Planeación agregada

La planeación agregada denominada planeación combinada Meredith & Gibbs, (1986), se encuentra ubicada en el nivel táctico del proceso jerárquico de planeación y tiene como misión fundamental, en aproximación al planteamiento de varios autores (Schroeder,1992; Chase & Aquilano,1995; Nahmias,1997; Rusell & Taylor,1998; Domínguez Machuca et al. 1995), la de establecer los niveles de producción en unidades agregadas a lo largo de un horizonte de tiempo que, generalmente, fluctúa entre tres (3) y 18 meses, de tal forma que se logre cumplir con las necesidades establecidas en el plan a largo plazo, y mantener a la vez niveles mínimos de costos y un buen nivel de servicio al cliente.

El término agregado, en este nivel de planeación, implica que las cantidades a producir se deben establecer de manera global o como lo expresa Schroeder et al. (2011), para una medida general de producción o cuando mucho para algunas pocas categorías de productos acumulados. De acuerdo con Nahmias (1997), puede ser aconsejable utilizar unidades agregadas tales como familias de productos, unidad de peso, unidad de volumen, tiempo de uso de la fuerza de trabajo o valor en dinero. De todas maneras, cualquier unidad agregada que se escoja debe ser significativa, fácilmente manejable y comprensible dentro del plan.

De otra parte, dentro del proceso de elaboración del plan agregado y en aras del cumplimiento de su objetivo fundamental, es importante el manejo de las variables que pueden influir en él, las cuales pueden ser clasificadas en dos grandes grupos (Schroeder et al., 2011):

En primer lugar, están las variables de oferta, las cuales permiten modificar la capacidad de producción a través de la programación de horas extras, contratación de trabajadores eventuales, subcontratación de unidades y acuerdos de cooperación; en segundo lugar, están las variables de demanda, las cuales pueden influir en el comportamiento del mercado mediante la publicidad, el manejo de precios, promociones, etc.

Así mismo, existen varias estrategias para la elaboración del plan agregado, las cuales han sido clasificadas por la mayoría de los autores en dos grupos, subdivididos así: (Schroeder et al., 2011; Chase & Aquilano, 2000; Nahmias, 1997; Rusell & Taylor, 1998; Vollmann et al. 1991; Domínguez Machuca et al 1995):

1. Estrategias puras:
 - Mano de obra nivelada (con empleo de horas extras o trabajadores eventuales).
 - Estrategia de persecución, adaptación a la demanda o de caza: (con o sin empleo de la subcontratación).
2. Estrategias mixtas: Se realizan al mezclar varias estrategias puras.

Debido a las diferentes estrategias que se pueden adoptar, se debe obtener un plan que satisfaga las restricciones internas de la organización y a la vez mantenga el costo de utilización de los recursos lo más bajo posible.

En cuanto a las técnicas existentes en la elaboración de planes agregados, de acuerdo con los autores consultados (Ibídem), las más renombradas son las siguientes:

- Métodos manuales de gráficos y tablas.
- Métodos matemáticos y de simulación: programación lineal (método simplex y método del transporte), programación cuadrática, simulación con reglas de búsqueda (Search Decision Rules) y programación con simulación.
- Métodos heurísticos: método de los coeficientes de gestión, método PSH (Production Switching Heuristic), reglas lineales de decisión (LDR) y búsqueda de reglas de decisión (SDR).

Un análisis comparativo acerca de algunas de las citadas técnicas fue desarrollado por Chase & Aquilano (1995) y se presenta en la tabla 1.1.

Tabla 1.1. Comparación entre algunos métodos de planificación agregada.

MÉTODOS	HIPÓTESIS	TÉCNICA
Gráficos y tablas.	Ninguna	Pruebas alternativas de planes por medio del tanteo. No es óptimo pero si fácil de desarrollar y comprender.
Programación con simulación.	Existencia de un programa de producción basado en computador.	Prueba los planes agregados desarrollados por otros métodos.
Programación lineal, método del transporte.	Linealidad, plantilla laboral constante.	Útil para el caso especial donde los costos de contratación y despido no son un factor. Proporciona una solución óptima.
Programación lineal, método simplex.	Linealidad	Puede manejar cualquier número de variables, pero muchas veces es difícil formular. Proporciona una solución óptima.
Reglas de decisión lineal.	Funciones cuadráticas de costos.	Utiliza coeficientes derivados matemáticamente para especificar las tasas de producción y los niveles de plantilla laboral en una serie de ecuaciones.
Coeficientes de gestión.	Los gerentes toman básicamente buenas decisiones.	Emplea el análisis estadístico de decisiones anteriores para tomar nuevas decisiones. Se aplica a un sólo grupo de gerentes y no es óptimo.
Reglas de búsqueda de decisiones.	Cualquier tipo de estructura de costos.	Usa procedimientos de búsqueda de patrones para encontrar los costos mínimos de las curvas de costos totales. Difícil de desarrollar, no es óptimo.

Fuente: Chase & Aquilano, 2011.

Cabe anotar que, debido a su fácil comprensión, tal vez las de mayor utilización por parte de los empresarios son las de tipo manual a través de gráficos y tablas. (Domínguez Machuca et al. 1995).

1.4. Sistemas para realizar la producción

La programación de las operaciones es la parte principal de lo que llamamos Sistemas para realizar la producción (MES, por sus siglas en inglés). Un MES representa un sistema de información que programa, remite, rastrea, vigila y controla la producción en los talleres de la planta. Estos sistemas también proporcionan nexos, en tiempo real, con los sistemas MRP (*Manufacturing Execution Systems*), la planeación de procesos y productos y los que llegan más allá de la fábrica, entre ellos la administración de la cadena de suministro, la ERP (*Enterprise Resource Planning*), las ventas y la administración de servicios. Hay una serie de negocios especializados en software que desarrollan e implantan los MES como parte de un conjunto de software.

1.5. La naturaleza e importancia de los centros de trabajo

Según Chase & Aquilano et al. (2000), un centro de trabajo es el área de un negocio donde se encuentran organizados los recursos productivos y donde se realiza el trabajo. El centro puede ser una sola máquina, un grupo de máquinas o un área donde se desempeña un tipo concreto de trabajo. Estos centros de trabajo pueden estar organizados de acuerdo con las funciones, en una configuración de talleres por tareas, o por productos, en una configuración de flujo, línea de montaje o célula de tecnología de grupo (GT cell, por sus siglas en inglés). Muchas empresas han dejado la configuración de talleres para pasar a las células de tecnología de grupo.

En el caso del taller, las tareas tienen que seguir rutas entre los centros de trabajo organizados por funciones para que se realice el trabajo. Cuando un producto llega a un taller (por ejemplo, el departamento de taladrado de una fábrica que produce tableros de circuitos impresos hechos a la medida), entra en una fila de espera para que un taladro perforo los orificios necesarios. En este caso la programación implica establecer el orden de las tareas y también asignar la máquina que se usará para hacer los orificios.

Recuerde que el flujo del trabajo es igual al flujo de dinero en efectivo y que la programación es la parte importante del proceso. Un programa constituye un calendario que señala cuándo desempeñar las actividades, emplear los recursos o asignar las instalaciones.

Programación detallada: Determina los momentos de comienzo y fin de las actividades de cada centro de trabajo, así como las operaciones de cada pedido para la secuencia realizada. (Adam & Ebert, 1991). Las técnicas más utilizadas son: programación adelante y hacia atrás, listas de expedición, gráficos Gantt y programación a capacidad finita.

Fluidez: Permite verificar que los tiempos planeados se cumplan, de tal forma que, si existen desviaciones en la producción real, se puedan tomar medidas correctivas a tiempo. (Adam & Ebert, 1991).

Asignación de carga: En aproximación a los conceptos de Adam & Ebert (1991), Schroeder et al. (2011) y Domínguez Machuca et al. (1995), esta se define como la asignación de tareas a cada centro de trabajo o de proceso, que permite controlar la capacidad y la asignación de actividades

específicas en cada centro de trabajo. En general las técnicas más empleadas en la asignación de carga son: Gráficos Gantt, perfiles de carga o diagramas de carga, métodos optimizadores (algoritmo de Kuhn o método Húngaro) y soluciones heurísticas (método de los índices).

Chase & Aquilano et al. (2000), definen a una característica que distingue un sistema de programación de otro, como la forma en que se concibe la capacidad para determinar el programa. Los sistemas de programación pueden usar cargas infinitas o finitas.

Carga infinita: Significa que el trabajo es asignado a un centro de trabajo con base en lo que se necesita con el tiempo. No consideran directamente si la capacidad de los recursos necesarios para realizar el trabajo es suficiente ni la secuencia real de las tareas que realiza cada uno de los recursos del centro de trabajo en cuestión. Muchas veces se realiza una comprobación simple de los recursos clave para saber si están sobrecargados, en forma agregada. Se calcula el volumen de trabajo requerido a lo largo de un período (generalmente una semana), y se usan los parámetros del tiempo de preparación y la corrida correspondiente a cada pedido. Cuando se utiliza un sistema de carga infinita, se estima el tiempo de entrega a partir de un múltiplo del tiempo esperado para las operaciones (tiempo de preparación y corrida) más la demora esperada para las filas de espera provocada por el movimiento de los materiales y la espera para que se trabaje el pedido.

Carga finita: Este método realmente programa con detalle cada recurso, a partir del tiempo de la preparación de la máquina y la corrida requerida para cada pedido. En esencia, el sistema determina con exactitud qué hará cada recurso en cada momento de la jornada laboral. Si una operación se

demora debido a la falta de una o varias partes, el pedido quedará esperando en la fila hasta que la operación precedente las ponga a su disposición. En teoría, al usar las cargas finitas, todos los programas son viables.

Estas formas de programar poseen particularidades:

- Los programas planeados con carga finita a menudo se vuelven obsoletos debido a retrasos en los materiales, cálculos imprecisos del tiempo de procesamiento, etc.
- La utilización de carga infinita permite conocer los requerimientos de los dimensionamientos básicos del sistema, para cumplimentar el programa en un menor tiempo posible, permite determinar la capacidad necesaria en cada período de tiempo.
- Ambos métodos comienzan con la programación en la fecha actual.
- La utilización de carga finita permite conocer las fechas de entrega de las distintas órdenes del programa dada la capacidad existente.
- La simulación de carga finita debe actualizarse con cierta frecuencia.
- Quienes defienden la carga finita afirman que obtienen cálculos de capacidad de carga más precisos en un menor plazo que los que se obtienen mediante el procedimiento de carga infinita.

Narasihman (1996), Schroeder et al. (2011) y Chase & Aquilano, et al. (2000), muestran otro ejemplo a considerar para programar o asignar tareas a centros de trabajo y es la forma de programar con respecto al tiempo:

- **Cargas a futuro (Programación hacia adelante):** Se entiende como la situación donde el sistema toma un pedido y después programa cada una de las operaciones que será realizada en un tiempo futuro. Un

sistema que programa hacia adelante indicaría la fecha más próxima en que se puede terminar un pedido. Puede ser utilizada tanto para capacidad finita o infinita. La programación no considera las fechas de entrega como una limitante y por lo tanto es posible exceder las fechas de entrega si es necesario, entonces, el propósito de la carga hacia el futuro, es determinar la fecha de terminación aproximada de cada proyecto. La programación hacia adelante es conveniente cuando el proveedor suele retrasarse en el cumplimiento de las fechas y/o existan grandes cantidades en inventario.

- **Carga retrospectiva (Programación hacia atrás):** Parte de alguna fecha futura (posiblemente la fecha de vencimiento) y programa las operaciones requeridas en secuencia inversa.

La programación hacia atrás indica cuándo se debe iniciar un pedido para que esté terminado en una fecha específica. La capacidad de los centros de trabajo puede excederse si es necesario. Schroeder et al. (2011), plantean que el propósito de este tipo de carga es calcular la capacidad requerida en cada centro de trabajo para cada período de tiempo, como resultado, quizás se tome la decisión de reasignar la capacidad entre centros de trabajos o de disponer de mayor capacidad mediante una planeación agregada revisada; no obstante si se considera carga finita el método resulta útil para la determinación de las fechas de inicio más tardía de los diversos programas productivos.

La programación hacia atrás es propia de las industrias de tipo montaje. Después de determinar las fechas requeridas para los submontajes más importantes, trabaja hacia atrás para determinar la fecha adecuada de liberación de cada orden de todos los componentes. En la práctica, frecuentemente se

utiliza una combinación de programación hacia adelante y hacia atrás.

1.6. Ejecución y control de la producción

El último paso dentro del proceso jerárquico de planificación y control, lo constituye el programa final de operaciones, el cual le permitirá saber a cada trabajador o a cada responsable de un centro de trabajo lo que debe hacer para cumplir el plan de materiales y con él, el MPS, el plan agregado y los planes estratégicos de la empresa. (Domínguez Machuca et al. 1995). Estas actividades, se enmarcan dentro de la fase de ejecución y control, que en el caso de las empresas fabriles se denomina gestión de talleres. Un taller de trabajo, de acuerdo con Chase & Aquilano (2000), se define como una organización funcional cuyos departamentos o centros de trabajo se organizan alrededor de ciertos tipos de equipos u operaciones; en ellos, los productos fluyen por los departamentos en lotes que corresponden a los pedidos de los clientes.

Es importante dentro de esta fase de gestión, tomar en consideración el tipo de configuración productiva que tiene el taller, pues en función de ella, será la técnica o procedimiento a emplear en su programación y control. Básicamente, la generalidad de los autores consultados, plantea, que la configuración de los talleres puede ser de dos tipos: (Domínguez Machuca et al. 1995; Adam & Ebert, 1991; Chase & Aquilano, 2000; Nahmias, 1997; Tawfik&Chauvel, 1992):

1. Talleres de configuración continua o en serie: Aquellos en donde las máquinas y centros de trabajo se organizan de acuerdo a la secuencia de fabricación (líneas de ensamblaje), con procesos estables y especializados en uno o pocos productos y en grandes lotes. En ellos, las actividades de programación están

encaminadas principalmente, a ajustar la tasa de producción periódicamente.

2. Talleres de configuración por lotes: Aquellos donde la distribución de máquinas y centros de trabajo, se organizan por funciones o departamentos con la suficiente flexibilidad para procesar diversidad de productos. Estos pueden ser de dos tipos: (Bera, 1996):
 - Configurados en Flow Shop: Donde los distintos productos siguen una misma secuencia de fabricación.
 - Configurados en Job Shop: Aquellos donde los productos siguen secuencias de fabricación distintas.

Así mismo, en la práctica, muchos talleres debido a las necesidades de fabricación y exigencias competitivas del mercado actual, han adoptado configuraciones híbridas, de las cuales, la más generalizada es la configuración celular o células de manufactura. Estas constituyen un sistema de fabricación diseñado para procesar familias de piezas, con una distribución física tal, que permite simplificar los procedimientos de planificación y control, (Vollmann, 1991).

En términos generales y en el caso más complejo, las actividades que se presentan en la programación y control de operaciones son: (Domínguez Machuca et al. 1995; Schroeder, 1992; Chase & Aquilano, 2000): Asignación de cargas, Secuenciación de pedidos y programación. A ellas, Adam & Ebert (1991), agregan otras dos: Fluidez y Control de insumo/producto (control input/output).

El cumplimiento de estas actividades debe responder a las siguientes preguntas del programador (Schroeder, 1992):

1. ¿Qué capacidad se necesita en el centro de trabajo?

2. ¿Qué fecha de entrega se debe prometer en cada pedido?
3. ¿En qué momento comenzar cada pedido?
4. ¿Cómo asegurar que los pedidos terminen a tiempo?

Las pregunta 1 puede ser resuelta a través de los análisis de carga; las preguntas 2 y 3 se resuelven con la aplicación de las técnicas de secuenciación y la programación detallada y la pregunta 4 con el análisis de fluidez y el control insumo producto.

1.7. Funciones típicas de la programación y el control

Se deben desempeñar las siguientes funciones para programar y controlar una operación:

- Asignar pedidos, equipo y personal a los centros de trabajo y otros lugares especificados. En esencia, se trata de la planeación de la capacidad a corto plazo.
- Establecer la secuencia de la ejecución de los pedidos (es decir, establecer el orden de prioridad de las tareas).
- Iniciar el desempeño del trabajo programado. Normalmente llamado **expeditar** los pedidos.
- Controlar el taller de la planta (o control de la actividad productiva), lo cual involucra:
 - ✓ Revisar la medida del avance de los pedidos y controlarlos mientras se trabaja en ellos.
 - ✓ Acelerar los pedidos atrasados y críticos¹.

¹A pesar del hecho de que los especialistas en control de producción le hacen mala cara a la expeditación, ésta no deja de ser una realidad de la vida. De hecho, un empleo típico a nivel de ingreso en control de producción es la de expeditador o "perseguidor de existencias". En algunas compañías, un buen expeditador, uno capaz de negociar un trabajo crítico a lo largo del sistema o de conseguir materiales que nadie pensó que estaban disponibles, es un bien muy atesorado.

En la figura 1.2 se ilustra un proceso simple de programación para un centro de trabajo. Al inicio de la jornada, el programador (en este caso una persona de control de producción asignada a este departamento) escoge y arma la secuencia de las tareas disponibles que se realizarán en las estaciones individuales de trabajo. Las decisiones del programador estarían sustentadas en los requerimientos de las operaciones y la ruta de cada trabajo, la situación que guardan las tareas en cada centro de trabajo, la fila de espera del trabajo antes de entrar en cada centro de trabajo, el orden de prioridad de las tareas, la disponibilidad de materiales, los pedidos anticipados de trabajos que deberán ser liberados más adelante en ese día y las capacidades de los recursos del centro de trabajo (mano de obra y máquinas).

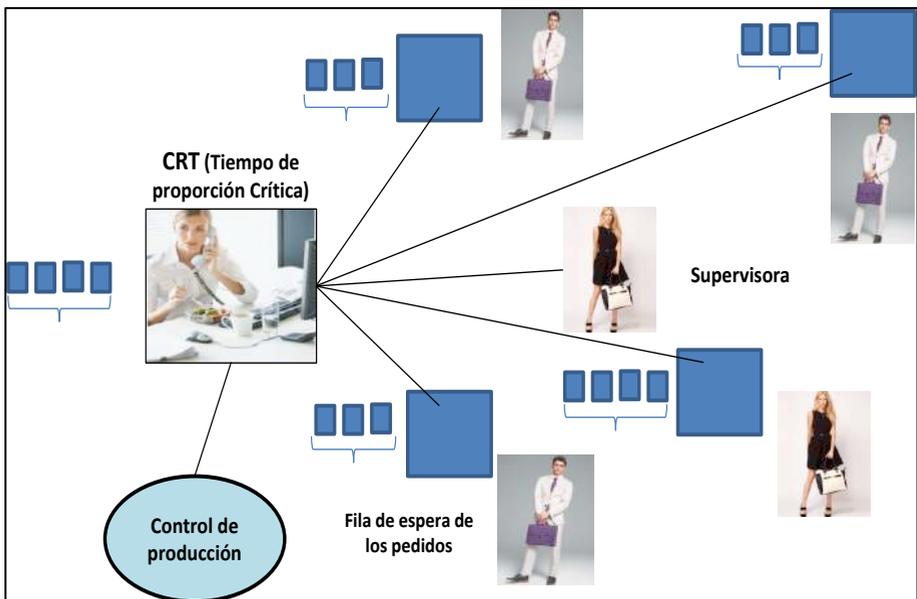


Figura 1.2. Proceso típico de programación.

El programador, para ayudar a organizar el programa, se tendría que basar en la información del estado en que estaban

los trabajos el día anterior, la información proveniente del exterior proporcionada por el control central de la producción, la ingeniería del proceso, etc. El programador también tendría que hablar con el supervisor del departamento acerca de la viabilidad del programa, sobre todo de consideraciones relativas a la fuerza de trabajo y a posibles cuellos de botellas. Los detalles del programa son comunicados a los trabajadores por medio de las listas de expeditación que aparecen en las terminales de computadoras, en papeles impresos o en una lista de lo que se debe hacer que se cuelga en las áreas centrales. Los tableros que exhiben el programa en forma muy visible son una forma eficaz para comunicar la prioridad de las tareas y su situación actual.

1.8. Objetivos de la programación del centro de trabajo.

Los objetivos de la programación del centro de trabajo son:

- Optimizar el uso de los recursos.
- Cumplir con las fechas de vencimiento.
- Reducir al mínimo los "tiempos de entrega".
- Reducir al mínimo el tiempo o el costo de la preparación de las máquinas.
- Reducir al mínimo el inventario de producción en proceso.
- Maximizar la utilización de las máquinas o la mano de obra.

Este último objetivo es controvertido porque el sólo hecho de mantener ocupados a todos los empleados o el equipo podría no ser la forma más eficaz de administrar el flujo a lo largo del proceso.

1.9. Control de insumos/productos.

El control de los insumos/productos (I/P) es una característica central del sistema de planeación y control de la producción. Su precepto básico es que el trabajo planeado que entra en un centro de trabajo jamás debe exceder del trabajo planeado que salga. Cuando el insumo excede a la salida, los atrasos se van acumulando en el centro de trabajo y, a su vez, esto aumenta las estimaciones del tiempo de entrega de los trabajos que se encuentran más adelante. Es más, cuando los trabajos se amontonan en el centro de trabajo, se presentan un congestionamiento, el procesamiento resulta ineficiente y el flujo del trabajo a los centros de trabajo que están más adelante es esporádico.

(La analogía del flujo de agua con el control de la capacidad de la planta² de la figura 1.3, ilustra el fenómeno general.)

² Fuente: "Training Aid - Shop Floor Control", sin fecha. Reproducido con Autorización de Apics - The Educational Society for Resource Management, Falls Church, VA.

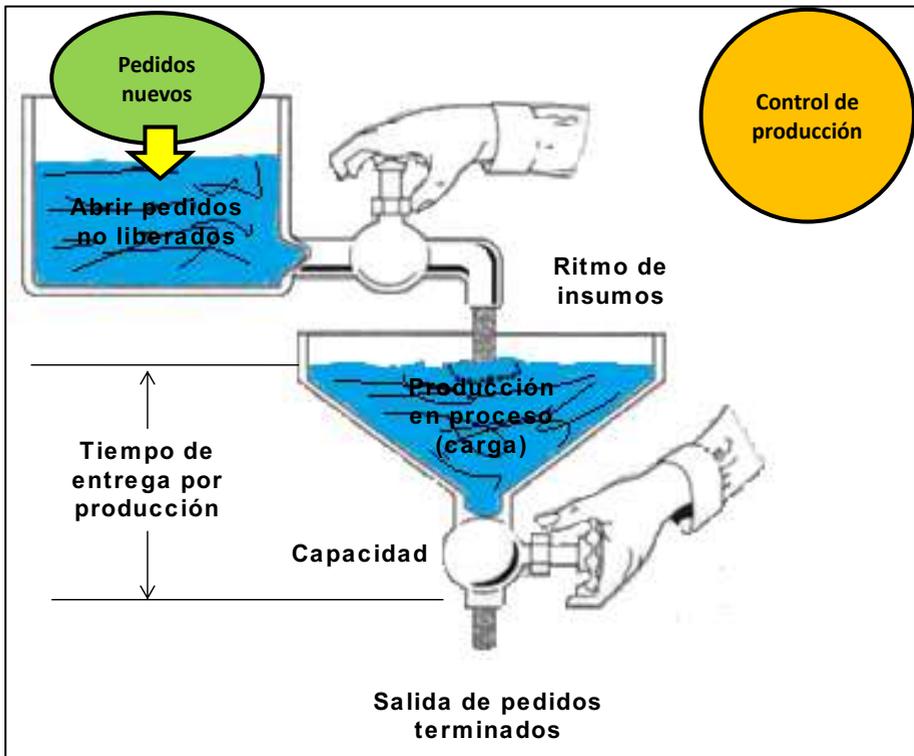


Figura 1.3. Control del flujo de la carga según la capacidad de la planta.

1.10. Principios de la programación del centro de trabajo

Los principios siguientes resumirían gran parte de la explicación de los sistemas de programación del centro de trabajo:

- El flujo del trabajo es directamente equivalente al flujo monetario.
- La velocidad del flujo por todo el taller debe servir de medida de la eficacia de un taller cualquiera.
- Programar los trabajos en forma de cuentas de collar, con los pasos del proceso lado con lado.

- Cuando se inicia un trabajo no debe ser interrumpido.
- Concentrar los centros de trabajo y los trabajos que representan un cuello de botella, para que permitan alcanzar una velocidad más eficiente.
- Reprogramar todos los días.
- Obtener retroalimentación, todos los días, respecto de trabajos que no han quedado terminados en cada uno de los centros de trabajo.
- Equiparar la información que entra del centro de trabajo y lo que el trabajador realmente puede hacer.
- Si se pretende aumentar la producción, buscar si existe alguna incompatibilidad entre el diseño de ingeniería y la ejecución del proceso.
- En un taller, es imposible tener certidumbre respecto de las normas, las rutas y demás, pero siempre se debe realizar un esfuerzo por alcanzarlas.

1.11. Programación del personal en los servicios

El problema de la programación en casi todas las organizaciones de servicios gira en torno a la posibilidad de establecer programas por semana, día y hora para el personal. A continuación se presentan algunos métodos analíticos simples para elaborar estos programas:

1.11.1. Programar días libres consecutivos

Un problema práctico que se encuentra en muchos servicios es armar programas de modo que los empleados puedan gozar de dos días libres consecutivos. La importancia del problema deriva del hecho de que la Fair Labor Standards Act (Ley de

normas justas para los trabajadores) requiere el pago de horas extras por todas aquellas horas trabajadas (para los trabajadores que cobran por hora) que pasen de las 40 horas a la semana. Evidentemente, si no se puede programar dos días consecutivos libres a la semana para cada empleado, la probabilidad de que se presente una cantidad innecesaria de horas extras es muy grande. Además, la mayoría de las personas seguramente preferirán tener dos días libres consecutivos por semana. El procedimiento heurístico siguiente ha sido diseñado para atacar este problema.

Objetivo: Encontrar el programa que reduce al mínimo la cantidad de cinco trabajadores por día que gozan de dos días libres consecutivos, sujeto a la demanda del programa diario de personal.

Procedimiento: A partir del total de trabajadores que se requiere para cada día de la semana, crear un programa y sumar a los trabajadores de uno en uno. Éste es un procedimiento que consta de dos pasos:

Paso 1. Asignar el primer trabajador a todos los días que requieren personal. Hacerlo simplemente y volver a copiar el total de requerimiento para cada día. (Esto último ofrece un camino fácil para seguir el rastro de la cantidad de trabajadores que se necesitan cada día.) Una cifra positiva significa que el trabajador ha sido asignado para trabajar ese día.

En virtud de que el primer trabajador tal vez haya sido asignado para trabajar los siete días, se encierran en un círculo los dos días consecutivos que tengan las cifras más bajas. Se considera que éstos serán los días libres. El par más bajo será aquel donde la cifra más alta del par sea igual o más baja que la cifra más alta de otro par cualquiera. Esto garantiza que los

días que tienen los requerimientos más altos estén cubiertos por el personal. (Tal vez se escoja el lunes y domingo, a pesar de que éstos se encuentran en extremos contrarios del orden de los días.) En caso de empate, se escoge el par de días libres que tienen el requerimiento más bajo con el día adyacente. Este día puede estar antes o después del par. Si continúa el empate, se escogerá el primer par de los que están empatados (no se moleste en usar más reglas para romper el empate, como sería la de los días adyacentes más bajos que están en segundo lugar).

Paso 2. En el caso del trabajador 2, restar 1 de cada uno de los días que no están encerrados en un círculo con cifras positivas y asentarlos en la fila del trabajador 2. Esto indica que se requiere un trabajador menos en estos días, porque se acaba de asignar al primer trabajador.

Se repiten estos dos pasos para el segundo trabajador, el tercer trabajador y así sucesivamente hasta que no se requiere más trabajadores para satisfacer el programa.

Ejemplo 1.1: Programar los días libres.

Cantidad de trabajadores requeridos							
Trabajador/Días	L	M	M	J	V	S	D
	4	3	4	2	3	1	2
Trabajador 1	4	3	4	2	3	1	2
Trabajador 2	3	2	3	1	2	1	2
Trabajador 3	2	1	2	0	2	1	1
Trabajador 4	1	0	1	0	1	1	1
Trabajador 5	0	0	1	0	0	0	0

Solución:

Esta solución tiene cinco empleados que cubren 19 días de trabajadores, pero asignaciones ligeramente diferentes también podrían ser satisfactorias.

El programa dice que las asignaciones son trabajador 1, S y D libres; trabajador 2, V y S libres; trabajador 3, S y D libres; trabajador 4, M y M libres; trabajador 5, sólo trabaja el miércoles porque no hay más requerimientos en los otros días. Advierta que los trabajadores 3 y 4 también tienen libre el jueves.

1.11.2. Programar horarios diarios de trabajo

Se muestra cómo una cámara de compensación de un banco y las operaciones de oficinas que no dan servicio al público de las sucursales de un banco grande establecen los horarios diarios de trabajo. La gerencia quiere, básicamente, encontrar un plan de personal que:

- Requiera la mayor cantidad de trabajadores para cumplir con la carga de trabajo diaria.
- Reducir al mínimo la variación entre la producción real y la planeada.

Para estructurar el problema, la gerencia del banco define los insumos (cheques, estados, documentos de inversión, etc.) como *productos*, los cuales son enviados por rutas que siguen distintos procesos o *funciones* (recibir, clasificar, cifrar, etc.).

Para resolver el problema el banco hace un pronóstico diario de la demanda, por producto, para cada función. Lo convierte a horas de trabajo requeridas por función, que, a su vez, se convierte en cantidad de trabajadores requeridos por función. A continuación hace una tabla con estas cifras, las resume y las ajusta por un factor de ausencias y vacaciones para obtener las horas planeadas. A continuación las divide entre el número de horas de la jornada laboral para obtener la cantidad de trabajadores requeridos. Esto último produce las horas diarias

del personal requerido. (Ver tabla 1.2). Esto se convierte en la base del plan de personal de los departamentos que enumeran los trabajadores requeridos, los trabajadores disponibles, la variación y la medida administrativa a la luz de la variación. (Ver tabla 1.3).

Tabla 1.2. Horas diarias del personal requerido para programar los horarios de t

PRODUCTO	VOLUMEN DIARIO	FUNCIÓN					
		RECIBIR		PREPROCESAR		MICROFILM	
		P/H	Hstd	P/H	Hstd	P/H	Hstd
Cheques	2000	1000	2.0	600	3,3	240	8
Estados	1000	-	-	600	1,7	250	4
Pagarés	200	30	6,7	15	13,3	-	
Inversiones	400	100	4.0	50	8.0	200	2
Cobranza	500	300	1,7	-	-	300	1
Total de horas requeridas			14,4		26,3		1
Multiplicado por 1,25 (faltas y vacaciones)			18.0		32,9		2
Dividido entre ocho horas nos da el personal requerido.			2,3		4,1		2

Nota: P/H indica el porcentaje de producción por hora; Hstd indica las

Tabla 1.3. Plan de personal.

FUNCIÓN	PERSONAL REQUERIDO	PERSONAL DISPONIBLE	VARIACIÓN (+/-)	MEDIDAS ADMINISTRATIVAS
Recibir	2,3	2.0	-0,3	Usar horas extra
Reprocesar	4,1	4.0	-0,1	Usar horas extra
Microfilmear	2,5	3.0	0,5	Usar exceso para verificar
Verificar	3,3	3.0	-0,3	Tomar 0,3 de tarea de microfilmear

1.11.3. Programar horarios de trabajo por horas

Los servicios, como serían los restaurantes, encuentran que sus requisitos cambian de una hora a otra. Necesitan más trabajadores en hora pico y menos en otras horas. La gerencia debe ajustarse continuamente a este requerimiento cambiante. Se puede apreciar este tipo de situación de programación de personal y se aplica la regla simple del principio de la “primera hora”. El siguiente ejemplo sirve para explicar el procedimiento. Se supone que cada trabajador labora ininterrumpidamente durante un turno de ocho horas. La regla de la primera hora dice que durante ésta se asigna una cantidad de trabajadores equivalente al requerimiento de ese período.

Para cada período subsecuente, se asigna la cantidad exacta de trabajadores adicionales necesaria para satisfacer los requerimientos. Cuando uno o varios trabajadores completan sus turnos en un período, se suman más trabajadores sólo si son necesarios para satisfacer el requerimiento. La tabla siguiente muestra los requerimientos de trabajadores para las primeras 12 horas en un restaurante que trabaja las 24 horas:

Programación de la Producción

PERÍODO												
Horario	10 A.M.	11 A.M.	12 A.M.	1 P.M.	2 P.M.	3 P.M.	4 P.M.	5 P.M.	6 P.M.	7 P.M.	8 P.M.	9 P.M.
Requerimiento	4	6	8	8	6	4	4	6	8	10	10	6

PERÍODO												
Horario	10 A.M.	11 A.M.	12 A.M.	1 P.M.	2 P.M.	3 P.M.	4 P.M.	5 P.M.	6 P.M.	7 P.M.	8 P.M.	9 P.M.
Requerimiento	4	6	8	8	6	4	4	6	8	10	10	6
Asignación	4	2	2	0	0	0	0	0	4	4	2	0
En activo	4	6	8	8	8	8	8	8	8	10	10	10

El programa muestra que los primeros cuatro trabajadores se asignan a las 10:00 A.M., dos son añadidos a las 11:00 A.M. y otros dos a las 12:00 A.M. para satisfacer los requerimientos. De las 12:00 P.M. a las 5:00 P.M. se tiene ocho trabajadores en activo. Nótese el exceso de personal entre las 2:00 P.M. y las 6:00 P.M. Los cuatro trabajadores asignados a las 10 A.M. terminan su turno de ocho horas a las 6:00 P.M. y se añade cuatro trabajadores que inician su turno. Los dos trabajadores que empezaron a las 11:00 A.M. salen a las 7:00 P.M. y la cantidad de trabajadores disponibles baja a seis. Por lo tanto, se asignan otros cuatro trabajadores a las 7:00 P.M. a las 9:00 P.M. hay diez trabajadores en activo, que es más de lo requerido, así que no se suma ningún trabajador. Este procedimiento continúa a medida que se distribuyen los requerimientos.

Otra opción es dividir los turnos. Por ejemplo, el trabajador puede llegar, trabajar cuatro horas y después volver dos horas más tarde para trabajar otras cuatro horas. El efecto de esta

opción en la programación es similar, en esencia, al que tiene cambiar el tamaño de los lotes en la producción. Cuando los trabajadores empiezan a trabajar, tienen que registrar su entrada, ponerse el uniforme y probablemente obtener la información necesaria de los trabajadores del turno anterior. Cabe considerar que esta preparación es el "costo de la preparación de las máquinas" en un escenario de producción. Dividir los turnos es como fabricar lotes de tamaño más pequeño y, por tanto, requiere de más preparación (más tiempo de preparación de máquinas).

1.12. Representación gráfica

Realizada la programación por uno u otro criterio, la representación gráfica es una herramienta de indudable valor, por lo que se procederá al estudio de la gráfica de Gantt.

1.12.1. Gráfica de Gantt

La gráfica de Gantt, fue propuesta por Henry, L. Gantt, discípulo de Taylor en 1917, constituyó el primer intento realizado para el control visual por medio de un gráfico de las cargas de trabajo asignadas a los puestos de trabajo y del progreso de la producción que las relaciona respecto al tiempo.

Aunque existen muchas variantes, en los problemas de programación, consiste en un cuadro donde el tiempo se encuentra a lo largo de la horizontal y los recursos, tales como máquinas, obreros u horas máquinas, en la vertical. Las tareas se programan acorde a su duración y al recurso en que se realiza. Resulta una ayuda visual a la programación y control de la producción y de gran uso en la manufactura, las tareas de mantenimiento y la actividad de los servicios.

A partir de ello se puede determinar:

- La fecha de inicio y determinación de cada operación en cada puesto de trabajo.
- El tiempo total de procesamiento (TTP).
- La duración del ciclo tecnológico de cada artículo e incluye los tiempos de interferencia.
- El tiempo en que los puestos de trabajo no tienen asignado trabajo (tiempo ocioso) durante el período de procesamiento de los artículos.
- El tiempo en que todos los artículos están almacenados (en proceso) entre los puestos de trabajo.
- La continuidad en el procesamiento de cada artículo.
- El porcentaje de utilización de los puestos de trabajo.
- La fecha de inicio y de terminación de cada operación de los artículos.
- Las operaciones y camino crítico.

1.12.2. Principales ventajas del gráfico de Gantt

- Compara lo que se hizo con lo que se debía hacer.
- Visualiza el paso de tiempo con la programación.
- Es continuo, resumido y de fácil lectura, además de ser fácil de confeccionar.
- Visualiza rápidamente los retrasos.

Según Sánchez Lara (1974) existen diversos tipos de gráficos de Gantt entre los que se pueden encontrar:

- **Gráficos de registro de máquinas:** Ideado para indicar la utilización de las máquinas o equipos y las razones de su actividad.
- **Gráfico de carga:** Se realiza para períodos largos y su finalidad es tener advertido a los directores de cualquier

fábrica en cuanto a la carga de trabajo en perspectiva para que puedan tomarse las medidas eficaces a fin de que se lleve a efecto. Este gráfico no muestra detalles sino, solamente las clases de máquinas y las horas de trabajo asignadas a las mismas por la unidad de tiempo establecida.

Ambas gráficas de Gantt serán utilizadas en la solución de tareas de programación en el contexto de este material.

La gráfica de Gantt para carga, presenta las ventajas de facilidad y claridad en la comunicación. Sin embargo, también posee limitaciones, la mayoría ya enunciadas en la programación con carga finita. Estas resultan ser un dispositivo de carácter determinista, no maneja la variabilidad de la duración de las actividades de los equipos (no se incluyen las fallas) y del tiempo real que trabajan las personas, cualquiera de las cuales permiten que el cálculo de la carga estimada no sea preciso, resulta una gráfica estática y debe actualizarse de forma periódica para que pueda incluir la llegada de nuevas órdenes de trabajo.

La gráfica de Gantt, en ocasiones, señala la necesidad de reasignación de recursos cuando la carga en cualquier puesto de trabajo se vuelve demasiado grande. Algunas de las medidas factibles de ser tomadas son:

- Los empleados que laboran en un centro de trabajo con poca carga temporalmente, pueden reasignarse a áreas con mucha carga.
- Uso de equipos de propósitos múltiples.
- Reasignar actividades de los centros con demasiada carga a los centros con menores cargas.
- Utilizar lotes para la transportación y ejecución de las operaciones, procesando unos y deteniendo aquellos no imprescindibles en ese momento.

- División del trabajo a realizar, lo que permite trasladar parte de la operación y, por lo tanto, la carga a otros puestos de trabajo.

El ejemplo que se expone, tomado de Everett & Eblet (1989), muestra una gráfica de Gantt para representar la carga de trabajo en la que se considera carga infinita asociado a una instalación de reparación de aviones, que cuenta con cuatro centros de trabajo (laminado metálico, electrónica, pintura e hidráulica) en los cuales se deben procesar cinco órdenes de trabajos.

Los aviones A, B, C, D y E requieren trabajos con placas metálicas; A, B y D son los únicos aviones que necesitan trabajos de electrónica. La gráfica muestra la carga de trabajo total estimada, que resulta de las órdenes en todos los centros de trabajo. El resultado muestra que en el centro de trabajo de laminado metálico es necesario trabajar 55 días, el centro de pintura deberá tener una carga de trabajo por 32 días, y así sucesivamente. El procedimiento gráfico se muestra en la figura 1.4 que la gráfica no especifica en qué tiempo deben terminarse los trabajos, tampoco muestra la secuencia en la que deben procesarse.

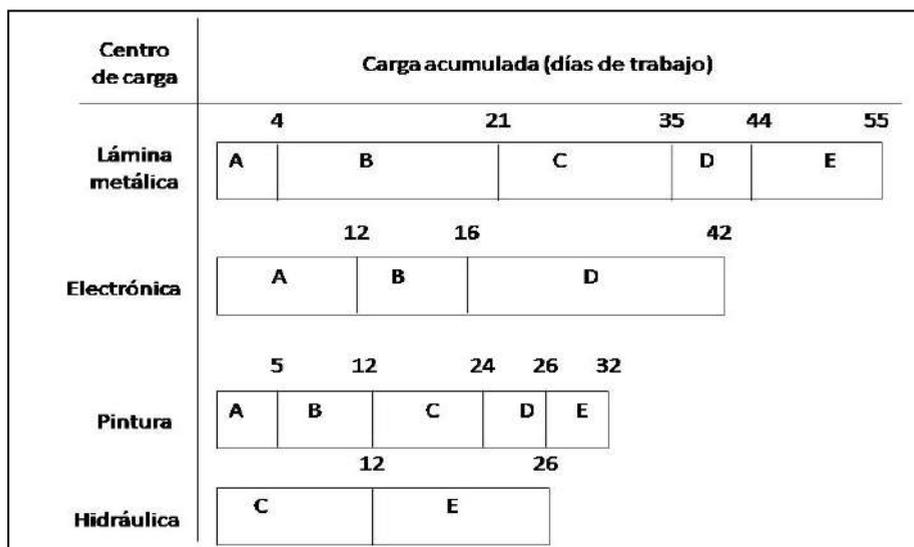


Figura 1.4. Gráfica de Gantt para carga, en una instalación de reparación de aviones.

1.13. Preguntas de autocontrol.

2. ¿Qué es la programación de operaciones? ¿Cuándo se aplica?
3. ¿Mencione las funciones típicas que integran la programación de la producción?
4. ¿Diga algunas de las técnicas que se pueden utilizar para la programación de la producción?
5. ¿Diga en que consiste la técnica de carga al futuro y carga retrospectiva. ¿Cuáles son sus propósitos?
6. ¿En qué consiste la carga finita y la carga infinita? ¿Qué objetivos persigue?

Caso 1: ¿Tener a los pacientes esperando? ¡No en mi consultorio!

Las buenas relaciones entre el médico y el paciente empiezan cuando las dos partes respetan la hora de su cita. Esto es

especialmente importante en mi especialidad, la pediatría. A las madres que me traen a niños con problemas menores no les gusta que sus hijos estén en la sala de espera con niños verdaderamente enfermos y los niños enfermos dan mucha lata cuando tienen que esperar demasiado tiempo.

Sin embargo, los retardos (sin importar quién sea el responsable) ocasionan problemas en todas las prácticas. Cuando uno va un poco atrasado, tal vez no logre recuperar el tiempo ese día. Si bien no es justo tener esperando a alguien que tal vez tenga otras citas, una encuesta reciente arrojó que el paciente promedio de un consultorio tiene que esperar casi 20 minutos. Los pacientes seguramente se aguantan, pero no les gusta nada tener que esperar.

Yo no lo tolero en mi consultorio y pienso que usted no lo debe hacer en el suyo. Veo a mis pacientes *justo* a la hora de su cita más de 99 por ciento de las veces. Así que tengo muchos pacientes agradecidos en mi consultorio. Los padres con frecuencia me comentan: “Nos encanta que sea puntual, ¿por qué otros médicos no pueden serlo también?, Siempre les contesto: No lo sé, pero estoy dispuesto a decirles cómo lo consigo”.

Apartar citas apegadas a la realidad.

La clave de una buena programación es asignar la cantidad correcta de tiempo a cada consulta, dependiendo de los servicios requeridos, y después respetarlo. Esto significa que el médico debe seguir su paso cuidadosamente, que las recepcionistas deben ser corregidas cuando se desvían del plan y que los pacientes deben aprender a respetar la hora de sus citas.

Mediante el cálculo real de la cantidad de consultas de pacientes, encontré que éstas se descomponen en varias categorías. Nosotros consideramos un lapso de media hora para un paciente nuevo, de 15 minutos para la revisión de un niño sano o de una enfermedad sin importancia y de cinco o diez minutos para revisar una enfermedad o lesión, una vacuna o un problema menor como serían las verrugas. Por supuesto que usted puede encontrar su propia forma de asignar el tiempo, pensando en cómo ejerce su profesión.

Cuando un paciente hace una cita, se le da una hora específica, por ejemplo, 10:30 o 2:40. Definitivamente está prohibido que alguien de mi consultorio diga a un paciente, “Venga dentro de 10 minutos” o “Venga dentro de media hora”. Las personas muchas veces interpretan estas instrucciones de otra manera y nadie sabe bien cuándo llegarán.

Uso, rutinariamente, tres cubículos para exámenes y tengo un cuarto que reservo para adolescentes y un quinto piso para urgencias. Con todos estos cubículos no pierdo tiempo esperando a los pacientes y ellos rara vez tienen que sentarse en la sala de recepción. De hecho, algunos de los niños pequeños se quejan de que no tienen tiempo para jugar con los juguetes y rompecabezas que hay en la sala de espera antes de ser examinado y sus madres tienen que dejarles jugar un rato cuando salen.

En un día con poco ajetreo, veo a entre 20 y 30 pacientes de las 9 A.M. y las 5 P.M., pero nuestro sistema de citas es lo bastante flexible como para que pueda ver a entre 40 y 50 pacientes en la misma cantidad de horas si tengo que hacerlo. Así es como apretamos el programa:

Mis dos asistentes (tres en los días muy activos) tienen órdenes estrictas de dejar una serie de espacios abiertos a lo largo de cada día para los pacientes que tengan enfermedades graves. Procuramos dejar más espacios en los meses de invierno y los días siguientes a fines de semana y fiestas, cuando tenemos más actividad que la de costumbre.

Las primeras consultas, para las cuales dejamos 30 minutos, siempre son programados en las horas o las medias horas. Si termino una de estas consultas antes de lo planeado, tal vez podamos meter a un paciente que debo atender de inmediato. Además, en caso necesario, podemos anotar dos o tres consultas en los 15 minutos que quedan entre las revisiones de los niños que están bien. Con este espacio de tiempo, puedo dedicar más o menos 10 minutos extra a un caso grave, a sabiendas que podré recuperar enseguida el tiempo perdido.

Pido a los padres de los pacientes nuevos que lleguen al consultorio unos cuantos minutos antes de su cita para que llenen los formularios necesarios. En ese momento, la recepcionista les informa que “el doctor siempre respeta estrictamente sus citas”. Algunos padres lo saben y me han escogido por esa razón. Sin embargo, otros ni siquiera saben que hay médicos que respetan el horario de las citas, así que pienso que más vale que se les advierta en la primera consulta.

Hacer espacio para las urgencias.

Las urgencias son el pretexto que suelen esgrimir los médicos cuando no cumplen con el horario de las citas. Pues bien, cuando me llega un niño con un brazo roto o el hospital me llama porque hay una cesárea de urgencia, evidentemente que dejo todo lo demás.

Si la interrupción es breve, tal vez sólo deba apresurarme para recuperar el tiempo perdido. Si existe la posibilidad de que dure más, se ofrece a los siguientes pacientes la opción de esperar o de hacer una nueva cita. A veces mis asistentes tienen que reprogramar todas las citas para el próximo par de horas. Sin embargo, la mayoría de estas interrupciones no tardan más de 10 o 20 minutos y los pacientes generalmente optan por esperar. Entonces trato de meterlos en los huecos que hemos dejado para los casos graves que requieren las citas de última hora.

Lo importante es que jamás permito que las urgencias echen a perder mi horario de todo el día. Cuando la demora ha quedado ajustada, tomo a tiempo las citas posteriores. La única situación que puedo imaginar que realmente arruinaría mi horario es una urgencia en el consultorio al mismo tiempo que una en el hospital, pero eso no ha ocurrido nunca.

Cuando recibo al paciente que dejé esperando le digo: “Disculpe la demora, pero tuve una urgencia”, una cortada muy seria(o lo que sea). Una respuesta típica de mi paciente es: “No hay problema doctor, en todos los años que llevo viniendo con usted jamás me ha hecho esperar antes y estoy seguro de que si mi hijo estuviera lastimado yo querría que acudiera a verlo”.

Excepto en el caso de una emergencia, pocos pacientes se presentan sin revisar, porque todo el mundo sabe que sólo recibo a pacientes con cita. Una persona que se presenta sin tener una urgencia recibe el mismo trato que si llamara por teléfono. La recepcionista le pregunta si quiere algún consejo o una cita. En el segundo caso le ofrece la cita que haya disponible más pronto para casos que no son graves.

Controlar el teléfono.

Las llamadas telefónicas de los pacientes pueden sabotear el horario de citas si uno lo permite. Yo no lo permito. A diferencia de otros pediatras, no tengo un horario regular para las llamadas, pero mis asistentes manejan las llamadas de los padres en cualquier momento dentro del horario del consultorio.

Si la pregunta es sencilla, como: ¿cuánta aspirina le doy a un niño de un año?”, la asistente contesta. Si la pregunta requiere que yo la conteste, la asistente la anota en el expediente del paciente y me la presenta cuando estoy viendo a otro niño. Anoto la respuesta o ella la anota en el expediente. Después se la comunica a la persona que llamó.

¿Y si la persona insiste hablar conmigo directamente? La respuesta siempre es: “El doctor hablará con usted personalmente si no tarda más de un minuto, de lo contrario tendrá que hacer una cita y venir a verle”. Es raro que me llamen en estos casos, pero si la madre está muy alterada, prefiero hablar con ella. No siempre la limito a un minuto. Tal vez dejo que la conversación dure dos o tres minutos. Pero la madre sabe que he dejado a un paciente para hablar con ella, así que suele ser breve.

Manejar a quienes llegan con retraso.

Algunas personas siempre llegan tarde, otras tienen razones legítimas para llegar tarde en ocasiones, como un neumático pinchado o “El niño me vomitó encima”. Sea como fuere, soy lo bastante terco como para no recibirlas de inmediato si llegan al consultorio con más de 10 minutos de retraso, porque hacerlo sería demorar a los pacientes que llegaron puntualmente. La

persona que llega con un margen de 10 minutos de retraso es recibida de inmediato, pero se le recuerda la hora de su cita.

Cuando pasan exactamente diez minutos de la hora reservada para el paciente y no se ha presentado en el consultorio, la recepcionista le llama a su casa para concertar otra cita. Si nadie contesta y el paciente llega al consultorio unos minutos después, la recepcionista le dice con amabilidad: "Le estábamos localizando. El doctor tuvo que seguir con otras citas, pero le hará un espacio tan pronto como sea posible". A continuación se anota en el expediente que el paciente ha llegado tarde, el tiempo de su demora y si se le recibió ese día o se le dio otra cita. Esto nos ayuda a detectar al raro infractor crónico y tomar medidas más drásticas en caso necesario.

A casi nadie le molesta esperar si sabe que ha sido el culpable de ocasionar la demora. Y yo prefiero despertar la ira de la rara persona a la que sí le importa, que correr el riesgo de enfadar a los muchos pacientes que, de lo contrario, tendrían que esperar habiendo llegado puntualmente. Si bien estoy dispuesto a ser firme con los pacientes, rara vez tengo que hacerlo. Mi consultorio no es un cuartel de ejército. Por el contrario, casi todo el mundo está contento con la forma que lo administramos y nos lo manifiestan con frecuencia.

Los que no se presentan.

¿Qué pasa con el paciente que tiene una cita y no se presenta ni tampoco se le encuentra por teléfono? Esto también se anota en su expediente. Normalmente hay una explicación sencilla como que la persona salió de viaje y olvidó la cita. Si ocurre una segunda vez, seguimos el mismo procedimiento. Sin embargo, a la tercera falta recibe una carta recordándole que ha hecho otras citas y que no las ha respetado y se le

informa que, la próxima vez, se le cobrará por hacernos perder ese tiempo.

Eso es lo más difícil que nos ponemos con las pocas personas que no se presentan a las citas. Jamás he dejado de ver a un paciente por hacerlo. De hecho, no recuerdo haberle cobrado a alguien que no se presentara, la carta con la amenaza aparentemente los cura. Cuando regresan (casi todos lo hacen) merecen el mismo respeto y trato que les doy a mis otros pacientes.³

Preguntas.

1. ¿Qué características de este sistema de horario de citas fueron cruciales para captar a “muchos pacientes agradecidos”?
2. ¿Qué procedimientos sigue este médico para mantener el sistema de citas lo bastante flexible como para dar cabida a los casos de urgencia y, sin embargo, respetar las citas de los otros pacientes?
3. ¿Cómo maneja los casos especiales como los de las personas que llegan tarde o que no se presentan?

Caso 2. Programación de un tribunal.⁴

La programación de tribunales normalmente requiere de un sistema de programación y un control más sistemático. En ocasiones los calendarios del tribunal están sobrecargados con el resultado de que los oficiales de policía, testigos, abogados y acusados pasan mucho tiempo esperando. Después de un día

³Fuente: W. B. Schafer, “Keep patients waiting? Not in my office”, *Medical Economics*, 12 de mayo de 1986, páginas 137-141. Derechos ©. de Medical Economics Company, Reproducido con autorización de Medical Economics Magazine. www.memag.com.

⁴ Este estudio se basa en un estudio de Shapiro (1971).

en el tribunal sin haber sido escuchados, algunos testigos se niegan a regresar.

Por otro lado, el mismo tribunal también puede sufrir de una baja carga de trabajo de casos, en este caso los jueces esperan y hay un uso ineficiente de los tribunales. Esta condición se presenta cuando los casos terminan muy pronto o los casos programados se retrasan.

En un intento por corregir estos problemas se desarrolló un sistema de programación de tribunales para el Tribunal Penal de la ciudad de Nueva York. El sistema se diseñó para lograr los siguientes cinco objetivos: 1) debería existir una alta probabilidad de que los jueces tengan qué hacer, 2) debería haber una alta probabilidad de que los casos se escuchen cuando se les programa, 3) se debería reunir varios casos para el mismo oficial de policía en el mismo día, 4) los casos con alta prioridad deberían programarse tan pronto como sea posible, 5) debería establecerse un tiempo de espera de límite máximo para todos los casos.

El corazón del sistema fue una regla de despacho con prioridades. La regla determinaba las prioridades de los casos basándose en factores tales como la gravedad del cargo, si el acusado estaba preso o no y el tiempo transcurrido desde su arresto. Cuando la prioridad de un caso alcanzaba cierto límite se le insertaba en el calendario del tribunal. En caso contrario se le devolvía al grupo de los no programados.

Cuando se programaba un caso se predecía el tiempo requerido mediante una ecuación de regresión múltiple que utilizaba variables de causa tales como una apelación del acusado, la gravedad del delito, el número de testigos y el juez que presidía. Se programaba entonces el tiempo predicho en el

primer lugar disponible en el calendario. Sin embargo, se mantenían algunos lugares disponibles para emergencias y reprogramación futura.

Cada día se revisaban las prioridades y se basaban en las condiciones actuales. Cualquier caso nuevo que tuviera una prioridad lo suficientemente alta se colocaba en el programa con la cantidad que se requería de tiempo predicho.

Con este ejemplo se ilustra la manera en que una operación de servicio puede utilizar una regla de despacho como parte de un sistema lógico de programación y control. Los métodos utilizados se incluyeron en un sistema de información que proporcionó una planeación y control generales del programa. El sistema ayudó a responder las preguntas cruciales que se requerían para desarrollar e implementar el programa.

TEMA 2.

**La asignación como función
dentro de la Programación de la
Producción**

Tema 2. La asignación como función dentro de la Programación de la Producción

2.1. Elementos generales de la Asignación

Asignación, según Fundora Miranda (1987), aborda aquellos problemas que se presentan cuando se tienen varias alternativas para la ejecución de un trabajo, pero existen limitaciones en la cantidad de recursos o en el modo de utilizarlos. En tal sentido se quiere distribuir los recursos de forma que se logre la alternativa más eficiente.

En la función asignación o carga, coinciden Companys Pascual, R. (1989), Schroeder, R (1992), Fundora Miranda (1987) que entre los métodos factibles a utilizar se encuentran el Método de los Índices, el de Transporte y el Húngaro, entre otros, cuyas condiciones de aplicación se muestran en la tabla 2.1.

Tabla 2.1. Métodos y condiciones de aplicación, para la asignación.

Método	Divisibilidad del Trabajo	Tareas asignadas por puestos de trabajo.	Tipo de solución	Restricciones
Índices	Es indivisible, un puesto de trabajo realiza plenamente la tarea.	Una o varias	Heurístico (no necesariamente óptima)	Se asignarán las tareas según la capacidad disponible de los puestos de trabajo.
Transporte	Es divisible entre varios puestos de trabajo.	Una o varias	Óptima	Se asignarán las tareas según la capacidad disponible de los puestos de trabajo.
Húngaro	Es indivisible, un puesto de trabajo realiza plenamente la tarea.	Una	Óptima	Igual cantidad de tareas que de puestos de trabajo.

En este capítulo se explicarán dos de los métodos referidos anteriormente.

2.2. Método de Transporte

Con este epígrafe se pretende demostrar de forma legible la aplicación del Método de Transporte en la función de asignación. El mismo cuenta con la tabla de transporte, problemas balanceados y desbalanceados: el uso de orígenes o destinos ficticios, búsqueda de una solución básica factible inicial (SBFI) al problema de transporte, a través de los cinco métodos existente: Método de la Esquina del Noroeste, Método del Costo Mínimo de la Matriz, Método del Costo Mínimo de la Fila, Método del Costo Mínimo de la Columna y Método de Vogels. Búsqueda de una solución óptima al problema de

transporte mediante el método *Stteping – Stone* y el método MODI (variables duales U_i , V_j), así como la interpretación de la solución.

Según AckoffBuisell, C (1977), Companys Pascual, R (1989), Corrons Prieto, L (1979), Díaz, A. (1993), Domínguez Machuca, J. A. (1990), Everett, E (1991), Maynard y Sasieni, Y. (1970), el problema del transporte se puede considerar como una generalización del problema de asignación. El método de transporte es un procedimiento de solución de propósito especial aplicable a cualquier modelo de red que tenga la estructura especial de problemas de transporte. Es en realidad una ingeniosa modificación del método simplex que aprovecha la estructura matemática especial del problema del transporte, en el cual los coeficientes de las diferentes variables en las restricciones del problema son siempre nulos o iguales a la unidad y es centenares de veces más veloz que el método simplex en general.

El modelo de transporte está asociado a problemas en los cuales hay que distribuir un producto desde un conjunto de orígenes a un conjunto de destinos, conociéndose que en cada origen hay una disponibilidad de ese producto y en cada destino una necesidad del mismo, conociéndose el costo unitario de transportación desde cada origen a cada destino y el objetivo es encontrar el plan de transportación desde cada origen a cada destino que haga mínimo el costo total.

Gráficamente el problema puede representarse de la siguiente manera:

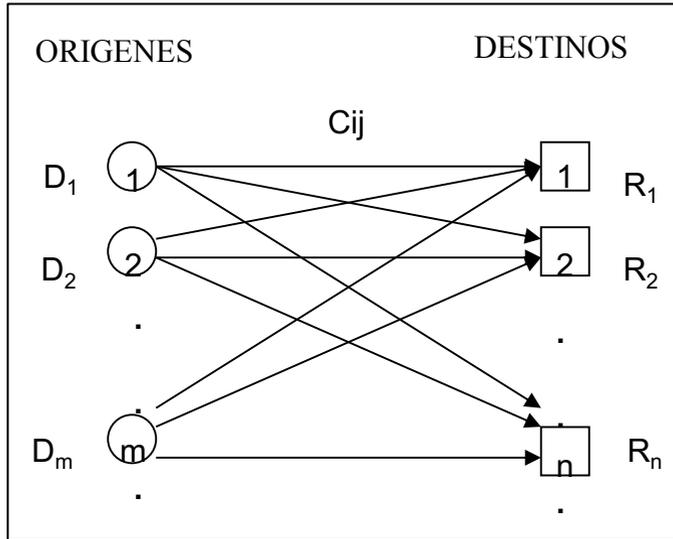


Figura 2.1. Esquema del problema de transporte.

Dónde:

D_i : Disponibilidad del producto en el origen $i = 1, 2, \dots, m$

R_j : Requerimiento o necesidad del producto en el destino
 $j = 1, 2, \dots, n$

C_{ij} : Costo unitario de enviar el producto del origen i al destino j

El Modelo de Transporte puede representarse de la siguiente forma:

▪ **Definición de variables.**

X_{ij} : cantidad de unidades de producto a enviar desde el origen i al destino j

Habrán $m \cdot n$ variables, $i = 1, 2, \dots, m$ y $j = 1, 2, \dots, n$

▪ **Función Objetivo**

$m \quad n$

$$\text{Minimizar } Z = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n C_{ij} X_{ij}$$

▪ **Restricciones**

n

$\sum X_{ij} = D_i$ Todo lo que sale del origen i tiene que ser igual a su disponibilidad

$$j = 1$$

$i = 1, 2, \dots, m$ y hay m restricciones de este tipo.

m

$\sum X_{ij} = R_j$ Todo lo que llega al destino j tiene que ser igual a su requerimiento

$$i=1$$

$j = 1, 2, \dots, n$ y hay n restricciones de este tipo.

Por tanto el modelo matemático del problema de transporte tiene $m+n$ restricciones.

Condición de no negatividad

$X_{ij} \geq 0$ para todo i, j .

Note que este problema de programación lineal tiene la característica de que todos los coeficientes a_{ij} de las restricciones serán uno o cero.

2.2.1 Características del modelo de transporte.

- Todos los coeficientes de las restricciones del modelo de transporte tienen coeficientes uno o cero.
- El modelo tiene $m + n$ restricciones, pero de ellas sólo $m + n - 1$ son linealmente independientes.
- El modelo tiene $m \cdot n$ variables, pero la solución básica tendrá $m+n-1$ variables básicas y el resto no básicas.

Para que el modelo tenga solución tiene que cumplirse que:

$$m \quad n$$

$$\sum_{i=1} D_i = \sum_{j=1} R_j$$

O sea la suma de las disponibilidades en los orígenes tiene que ser igual a la suma de las necesidades o requerimientos en los destinos. A este tipo de problema se le denomina el problema balanceado de transporte.

- ✚ Si los valores de las disponibilidades y requerimientos son entero entonces el valor de las variables de decisión también serán enteros.

En el caso del Problema de Transporte la información disponible se organizará en una tabla de forma matricial y que tiene la siguiente forma:

Tabla 2.2. Tabla de transporte.

ORÍGENES	DESTINOS				DISPONIBILIDAD
	1	2	...	n	
1	C_{11}	C_{12}		C_{1n}	D_1
2	C_{21}	C_{22}	...	C_{2n}	D_2
.	
.	
.	
m	C_{m1}	C_{m2}	...	C_{mn}	D_m
REQUERIMIENTOS	R_1	R_2		R_n	

Note que cada casilla o celda de la tabla anterior se corresponde con una variable del Modelo de Transporte, cada fila representa una de las restricciones de los orígenes y cada columna una de las restricciones de los destinos. La organización que se utilizará en el curso es colocar el costo de cada variable en el extremo superior izquierdo de cada celda.

2.2.2 Solución por el método de transporte

El método de transporte en realidad no es un solo método, sino varios. Sin embargo, existe una estrategia general, como se muestra en la figura 2.2. Primero, se construye una matriz de transporte y después se encuentra una solución inicial. Esta solución inicial puede ser óptima o no. La única manera de saberlo es probándolo y existen varias técnicas para hacerlo. Si la solución no es óptima, se revisa y la prueba se repite.

Los pasos a seguir para aplicar el Método de Transporte son los siguientes:

1. Construir la matriz de transporte.
2. Buscar una Solución Básica Factible Inicial (SBFI), lo que puede hacerse a través de:
 - Método de la Esquina del Noroeste.
 - Método del Costo Mínimo de la Matriz
 - Método del Costo Mínimo de la Fila
 - Método del Costo Mínimo de la Columna
 - Método Vogels
3. Probar si la solución es óptima, puede hacerse a través de:
 - Método de *Stepping – Stone* (Saltando sobre piedras)
 - Método MODI (variables duales) U_i, V_j
4. Si la solución no es óptima, buscar otra SBFI.
5. Interpretar la solución.

En resumen la esencia del método de transporte es como se muestra en la figura 2.2

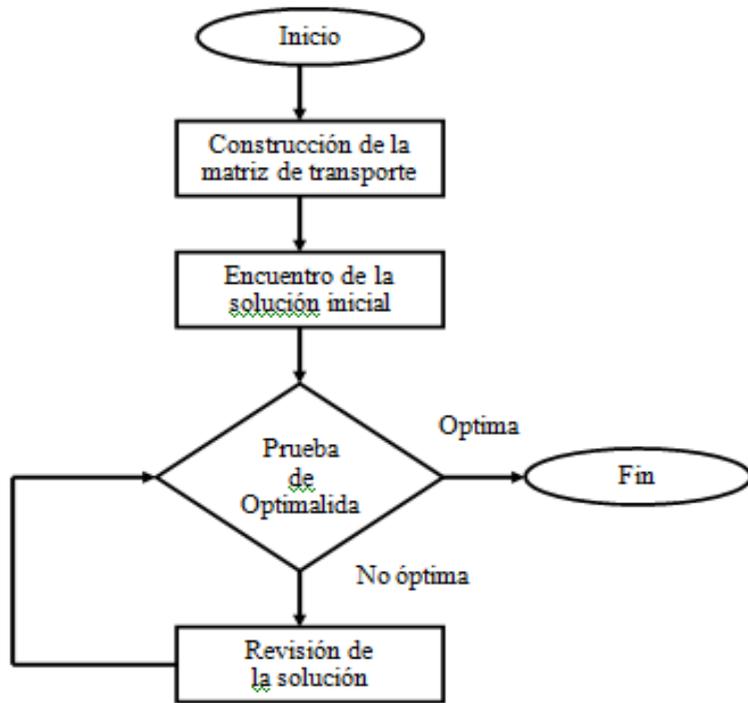


Figura 2.2 Estrategia general del método de transporte.

Ejemplo 2.1. Para la comprensión del Método de Transporte.

Una Empresa Agrícola tiene 2 áreas de cultivo cubierto que suministran el tomate fresco a 3 hoteles en Varadero. Las disponibilidades diarias de tomate, en kilogramos en cada área de cultivo son de 80 y 120 respectivamente. Cada día los hoteles requieren de 90, 60 y 50 kg. de tomate respectivamente.

Se ha recopilado información sobre los costos de transportación, en moneda / Kg., los cuales se muestran en la siguiente tabla:

HOTELES		1	2	3
AREAS DE CULTIVO	A	12	10	15
	B	9	12	14

a.) Construya la Tabla de Transporte para este problema.

Solución

La Tabla de Transporte será:

Tabla 2.3. Tabla de transporte

ORÍGENES	DESTINOS (HOTELES)			DISPONIBILIDAD
(áreas de cultivo)	1	2	3	
A	12	10	15	80
B	9	12	14	120
REQUERIMIENTOS	90	60	50	

Observe que este problema es balanceado, según la tabla 2.3. ya que la suma de los requerimientos es igual a la suma de las disponibilidades, o sea:

$$80 + 120 = 90 + 60 + 50$$
$$200 = 200$$

2.2.3 Problema desbalanceado de transporte

El problema de transporte será desbalanceado si la suma de las disponibilidades es distinta a la suma de las necesidades o requerimientos. Pueden entonces presentarse dos casos de desbalance: que las disponibilidades sea mayor que los requerimientos o el caso inverso. Como una condición necesaria para la solución de un problema de transporte es que el mismo sea balanceado, será necesario buscar un procedimiento que permita pasar un problema desbalanceado a balanceado.

Caso en que las disponibilidades son mayores que las necesidades

$$\sum_{i=1}^m D_i > \sum_{j=1}^n R_j$$

El balance de este problema se lograría si se adiciona una cantidad R_{n+1} , cuyo valor sería:

$$R_{n+1} = \sum_{i=1}^m D_i - \sum_{j=1}^n R_j$$

O sea, se adiciona al problema un “**destino ficticio**”, cuyo requerimiento sería la diferencia que crea el desbalance. Los costos que se asignan a este nuevo destino son $C_{i\ n+1} = 0$. Esto generalmente es así, pero puede haber problemas en que se asignen otros costos distintos de cero.

La Tabla de Transporte para este tipo de problema quedaría de la siguiente forma: ver tabla 2.3.3.1

Caso en que los requerimientos o necesidades son mayores que las disponibilidades.

$$n \quad m$$

$$\sum_{j=1} R_j > \sum_{i=1} D_i$$

En este caso para lograr el balance se adiciona al problema un “**origen ficticio**” cuya disponibilidad será la diferencia de la suma de los requerimientos y de la suma de las disponibilidades, esto es:

$$n \quad m$$

$$D_{m+1} = \sum_{j=1} R_j - \sum_{i=1} D_i$$

Tabla 2.4 Tabla de transporte para problemas desbalanceados siendo la disponibilidad es mayor que las necesidades.

ORÍGENES	DESTINOS					DISPONIBILIDAD
	1	2	...	n	F	
1	C ₁₁	C ₁₂		C _{1n}	0	D ₁
2	C ₂₁	C ₂₂	...	C _{2n}	0	D ₂
m	C _{m1}	C _{m2}	...	C _{mn}	0	D _m
REQUERIMIENTOS	R ₁	R ₂	...	R _n	R _{n+1}	

Al igual que en el caso del destino ficticio, los costos asociados a las variables que componen el origen ficticio se asumen

generalmente como cero. La Tabla de Transporte entonces quedaría:

Tabla 2.5 Tabla de transporte para problemas desbalanceados siendo las necesidades mayor que la disponibilidad.

ORÍGENES	DESTINOS				DISPONIBILIDAD
	1	2	...	n	
1	C_{11}	C_{12}		C_{1n}	D_1
2	C_{21}	C_{22}	...	C_{2n}	D_2
.	
.	
.	
m	C_{m1}	C_{m2}	...	C_{mn}	D_m
F	0	0	...	0	D_{m+1}
REQUERIMIENTOS	R_1	R_2		R_n	

Ejemplo 2.2

Suponga que en el ejemplo 1 los requerimientos de tomate de los hoteles se incrementan y ahora serán de 100, 90 y 50 kg respectivamente. También se plantea la necesidad de hacer la entrega completa al hotel 2. Plantee la Tabla de transporte a esta nueva situación.

Solución

Para este caso el problema de transporte es desbalanceado, ya que la suma de los requerimientos excede a la suma de las disponibilidades ($\sum R_j > \sum D_i$) **y por tanto habrá que incorporar al problema un origen ficticio**. La disponibilidad de dicho origen será:

$$D_f = (100 + 90 + 50) - (120 + 80) = 40$$

La tabla para este ejemplo será la tabla 2.6

Note que en la variable correspondiente a la celda F2 se ha puesto un costo de M (muy grande) para garantizar que en la solución óptima esta variable no tome valor y de esta forma se garantiza que al hotel 2 solo lleguen productos desde los orígenes reales y cubra totalmente su demanda como se planteaba.

Tabla 2.6 Tabla de transporte para el ejemplo 2.

ORÍGENES	DESTINOS (HOTELES)			DISPONIBILIDAD
(áreas de cultivo)	1	2	3	
A	12	10	15	80
B	9	12	14	120
F	0	M	0	40
REQUERIMIENTOS	100	90	50	

2.2.4 Búsqueda de una solución básica factible inicial al problema de transporte

El procedimiento para la búsqueda de una solución óptima al problema de transporte, es un algoritmo basado en el Método Simplex, pero que aprovecha la característica que los coeficientes de las restricciones son uno o cero y el procedimiento se simplifica.

El procedimiento de optimización parte de hallar una solución básica factible inicial al problema, que tendrá $m+n-1$ variables básicas y el resto de las variables serán no básicas, o sea, iguales a cero.

El algoritmo general de solución se puede representar según la figura 2.3.

Para la búsqueda de una solución básica factible inicial existen varios métodos; uno sencillo pero poco eficiente, que recibe el nombre de Regla de la Esquina del Noroeste, otro más eficiente que se basa en la matriz de mínimo costo y por último el más eficiente de los tres, el Método Vogels, los cuales se explican a continuación.

2.2.4.1 Método de la Esquina del Noroeste

Este método basa su nombre en que el procedimiento inicia la asignación por la celda o casilla superior izquierda de la tabla de transporte, asignando la máxima cantidad posible acorde con la disponibilidad y requerimiento que debe cumplirse en esa casilla, moviéndose después a la casilla contigua de la derecha o de abajo donde exista disponibilidad de asignar una cantidad a dicha variable y de esa forma continua hasta llegar a la celda inferior derecha en la que acaba el procedimiento.

Este método garantiza que se tengan $m+n-1$ variables básicas.

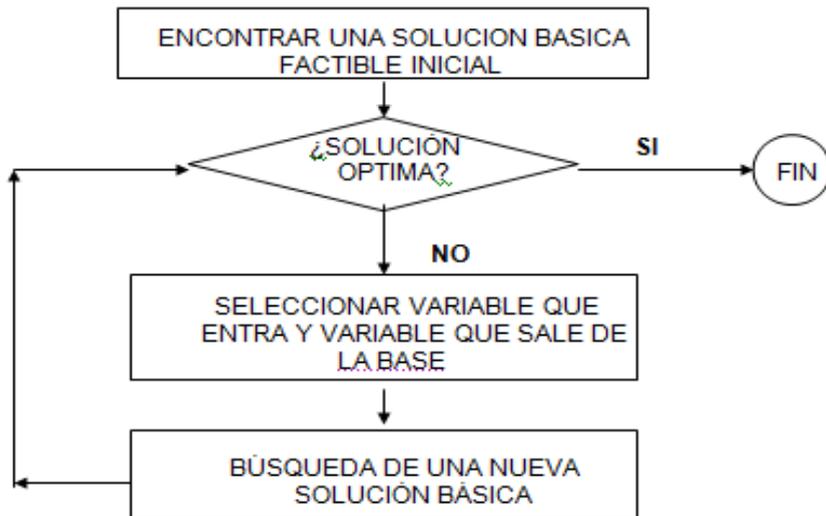


Figura 2.3 Algoritmo general de solución para la búsqueda de una solución básica factible inicial al problema de transporte.

Ejemplo 2.3 Para la comprensión del Método de la esquina noroeste

Se encontrará una Solución Básica Factible Inicial (SBFI) utilizando el método de la esquina del noroeste en el ejemplo que se viene desarrollando. Ver tabla 2.6.

El procedimiento se señala en la tabla 2.7. Se inicia en la celda A1. Para esa celda hay una disponibilidad de 80 y un requerimiento de 100, por lo tanto se asigna a esa variable un valor de 80, anulándose la disponibilidad de esa fila y quedando 20 unidades a cubrir del requerimiento de la columna, entonces se traslada a la celda contigua de abajo.

En la celda B1 hay una disponibilidad de 120 unidades y quedan 20 unidades de requerimiento por cubrir, por lo que se

asigna a esta variable el valor de 20, agotándose los requerimientos de la columna y quedando 100 unidades de disponibilidad y entonces se traslada a la casilla contigua de la derecha, o sea a la B2.

Tabla 2.7 Aplicación del Método de la Esquina del Noroeste

Orígenes (áreas de cultivo)	DESTINOS (HOTELES)			DISPONIBILIDAD
	1	2	3	
A	12	10	15	(80) 0
B	9	12	14	(120),(100),(10),0
F	0	M	0	(40) 0
REQUERIMIENTOS	(100) (20) 0	(90) 0	(50) (40) 0	

Diagrama de flujo de asignación:
 - Una flecha vertical de 80 unidades apunta de la celda A1 a B1.
 - Una flecha horizontal de 20 unidades apunta de la celda B1 a B2.
 - Una flecha horizontal de 90 unidades apunta de la celda B2 a B3.
 - Una flecha vertical de 40 unidades apunta de la celda B3 a F3.

En la celda B2 hay una disponibilidad de 100 y un requerimiento de 90, por lo que se asigna 90 unidades a esta variable, agotándose los requerimientos de la columna y quedando 10 unidades de disponibilidad, por lo que se traslada a la casilla contigua de la derecha, o sea a B3.

Siguiendo el mismo razonamiento en la celda B3 se puede asignar como máximo 10 unidades y finalmente se mueve a la casilla F3 donde se asignan 40 unidades, finalizando el proceso de búsqueda de la SBFi.

Esta Solución Básica Factible Inicial (SBFI) sería:

$$\begin{aligned}
 X_{A1} &= 80 \\
 X_{B1} &= 20 \\
 X_{B2} &= 90
 \end{aligned}$$

$$X_{B3} = 10$$

$$X_{F3} = 40$$

Y el costo total de esta solución será:

$$CT = 12*80 + 9*20 + 12*90 + 14*10 + 0*40 = 2.360,00$$

2.2.4.2 Método de la matriz mínima de costos o costo mínimo de la matriz

Este método considera para la asignación inicial los costos de la tabla 2.3.3.3 y por ende halla una SBFI más eficiente, o sea, de igual o menor valor para su costo total, por lo que se iniciaría el proceso con una solución más cercana a la solución óptima del problema.

El procedimiento se basa, en asignar el mayor valor posible a la variable (celda) que tenga el mínimo costo en la matriz de costo del problema bajo estudio. Se inicia con la tabla completa y en cada paso se reducirá una fila o una columna, según se agote la disponibilidad o el requerimiento y quedará una matriz reducida sobre la cual se hará la nueva asignación, en la celda de menor costo y así hasta que sólo queda una fila o columna en que se realiza la asignación final.

Aplicando el procedimiento al ejemplo que se viene desarrollando se obtiene lo siguiente:

Ejemplo 2.4

Tabla 2.8 Tabla de transporte para el ejemplo a desarrollar.

ORÍGENES (áreas de cultivo)	DESTINOS (HOTELES)			DISPONIBILIDAD
	1	2	3	
A	12	10	15	80
B	9	12	14	120
F	0	M	0	40
REQUERIMIENTOS	100	90	50	

En la matriz inicial hay 2 casillas con costo cero y se seleccionará una de ellas para hacer la primera asignación. Suponga que se selecciona la variable o celda F1. En esta celda podría asignarse como máximo 40 unidades y se agota la disponibilidad de esa fila. La tabla quedaría:

Tabla 2.9 Primera asignación.

ORÍGENES (áreas de cultivo)	DESTINOS (HOTELES)			DISPONIBILIDAD
	1	2	3	
A	12	10	15	80
B	9	12	14	120

F	0	M	0	(40)	0
	40				
REQUERIMIENTOS	(100)	90	50		
	60				

Para el próximo paso de asignación la matriz de costo queda reducida a las dos primeras filas, valores en rojo, y dentro de esa matriz se selecciona la celda de mínimo costo que será la B1 con un costo de 9 y en ella se puede asignar como máximo 60 unidades. La tabla ahora quedaría: Ver tabla 2.10.

De esta forma queda eliminada la columna uno de la tabla y la matriz de costo se reduciría a los elementos de la 1era y 2da fila y de la 2da y 3era columna, cuyos costos se marcan con color rojo. De la matriz reducida el costo mínimo se corresponde con la celda A2 con un valor de 10 y en ella se puede asignar como máximo 80 unidades y de esa forma se elimina la primera fila de la tabla. Ver tabla 2.11.

Como sólo queda una fila en ella se hace la última asignación logrando que la tabla quede balanceada y la SBFI sería: Ver tabla 2.12.

Tabla 2.10 Segunda asignación

ORÍGENES	DESTINOS (HOTELES)			DISPONIBILIDAD	
	1	2	3		
(áreas de cultivo)					
A	12	10	15	80	
B	9	12	14	(120)	60
	60				
F	0	M	0	(40)	0

	40			
REQUERIMIENTOS	(100)	90	50	
	(60)			
	0			

Tabla 2.11 Tercera asignación

ORÍGENES (áreas de cultivo)	DESTINOS (HOTELES)			DISPONIBILIDAD	
	1	2	3		
A	12	10	15	(80)	0
	-	80			
B	9	12	14	(120)	60
	60				
F	0	M	0	(40)	0
	40				
REQUERIMIENTOS	(100)	(90)	50		
	(60)	10			
	0				

Tabla 2.12 Cuarta y quinta asignación.

ORÍGENES (áreas de cultivo)	DESTINOS (HOTELES)			DISPONIBILIDAD		
	1	2	3			
A	12	10	15	(80)	0	
	-	80	-			
B	9	12	14	(120)	60	0
	60	10	50			

F	0	M	0	(40)	0
	40	-	-		
REQUERIMIENTOS	(100)	(90)	(50)		
	(60)	10	0		
	0	0			

Tabla 2.13 Solución básica factible inicial encontrada.

ORÍGENES (áreas de cultivo)	DESTINOS (HOTELES)			DISPONIBILIDAD
	1	2	3	
A	12	10	15	80
	-	80	-	
B	9	12	14	120
	60	10	50	
F	0	M	0	40
	40	-	-	
REQUERIMIENTOS	100	90	50	

Esta Solución Básica Factible Inicial (SBFI), es:

$$X_{A2} = 80$$

$$X_{B1} = 60$$

$$X_{B2} = 10$$

$$X_{B3} = 50$$

$$X_{F1} = 40$$

$$CT = 10 \cdot 80 + 9 \cdot 60 + 12 \cdot 10 + 14 \cdot 50 + 0 \cdot 40 = 2.160,00$$

Se puede observar que el costo total resulta menor que la encontrada por el método de la esquina del noroeste.

Si se hace la asignación inicial por el mismo método, pero iniciando en la otra celda que tenía valor cero, la F3, verá que

la SBFI tendrá todavía un valor menor que será igual a 1.960,00 y esa SBFI es a su vez, como veremos posteriormente la solución óptima de este problema de transporte.

2.2.4.3 Método del costo mínimo de la fila

Este método considera para la asignación inicial los costos de la tabla 2.6.

El procedimiento se basa, en asignar el mayor valor posible a la variable (celda) que tenga el mínimo costo en cada una de las filas del problema bajo estudio. Se inicia con la tabla completa y en cada paso se reducirá una fila o una columna, según se agote la disponibilidad o el requerimiento y quedará una matriz reducida sobre la cual se hará la nueva asignación, en la celda de menor costo y así hasta que sólo queda una fila o columna en que se realiza la asignación final.

Aplicando el procedimiento al ejemplo que se viene desarrollando se obtiene lo siguiente:

Ejemplo 2.5

Tabla 2.14 Tabla de transporte para el ejemplo a desarrollar.

ORÍGENES (áreas de cultivo)	DESTINOS (HOTELES)			DISPONIBILIDAD
	1	2	3	
A	12	10	15	80

B	9	12	14	120
F	0	M	0	40
REQUERIMIENTOS	100	90	50	

En la primera fila la variable o celda con el menor costo es A2, en esta celda podría asignarse como máximo 80 unidades y por lo tanto se agota la disponibilidad de esa fila. La tabla quedaría:

Tabla 2.15 Primera asignación.

ORÍGENES (áreas de cultivo)	DESTINOS (HOTELES)			DISPONIBILIDAD	
	1	2	3		
A	12	10 80	15	(80)	0
B	9	12	14	120	
F	0	M	0	40	
REQUERIMIENTOS	100	(90) 10	50		

Para el próximo paso de asignación la matriz de costo queda reducida a las dos últimas filas, valores en rojo, y dentro de esa matriz, en la primera fila se selecciona la celda de mínimo costo que será la B1 con un costo de 9 y en ella se puede asignar

como máximo 100 unidades. La tabla ahora quedaría: Ver tabla 2.16.

De esta forma queda eliminada la columna 1 de la tabla y la matriz de costo se reduciría a los elementos de la 2da y 3era fila y de la 2da y 3era columna, cuyos costos se marcan con color naranja. De la matriz reducida el costo mínimo de la primera fila se corresponde con la celda B2 con un valor de 12 y en ella se puede asignar como máximo 10 unidades y de esa forma se elimina la 2da fila de la tabla. Ver tabla 2.17.

Como sólo queda una columna en ella se hace la última asignación (celda B3) logrando que la tabla quede balanceada y la SBFi sería: Ver tabla 2.18.

Tabla 2.16 Segunda asignación.

ORÍGENES (áreas de cultivo)	DESTINOS (HOTELES)			DISPONIBILIDAD	
	1	2	3		
A	12	10	15	(80)	0
		80			
B	9	12	14	(120)	20
	100				
F	0	M	0	40	
REQUERIMIENTOS	100	(90)	50		
	0	10			

Tabla 2.17 Tercera asignación.

ORÍGENES (áreas de cultivo)	DESTINOS (HOTELES)			DISPONIBILIDAD		
	1	2	3			
A	12	10	15	(80)	0	
		80				
B	9	12	14	(120)	(20)	10
	100	10				
F	0	M	0	40		
REQUERIMIENTOS	100	(90)	50			
	0	(10)				
		0				

Tabla 2.18 Cuarta y quinta asignación.

ORÍGENES (áreas de cultivo)	DESTINOS (HOTELES)			DISPONIBILIDAD			
	1	2	3				
A	12	10	15	(80)	0		
	-	80	-				
B	9	12	14	(120)	(20)	(10)	0
	100	10	10				
F	0	M	0	40	0		
	-	-	40				
REQUERIMIENTOS	100	(90)	50				
	0	(10)	(10)				
		0	0				

Tabla 2.19 Solución Básica Factible Inicial (SBFI), encontrada.

ORÍGENES	DESTINOS (HOTELES)			DISPONIBILIDAD
(áreas de cultivo)	1	2	3	

A	12	10	15	80
	-	80	-	
B	9	12	14	120
	100	10	10	
F	0	M	0	40
	-	-	40	
REQUERIMIENTOS	100	90	50	

Esta Solución Básica Factible Inicial (SBFI), es:

$$X_{A2} = 80$$

$$X_{B1} = 100$$

$$X_{B2} = 10$$

$$X_{B3} = 10$$

$$X_{F3} = 40$$

$$\mathbf{CT = 10*80 + 9*100 + 12*10 + 14*10 + 0*40 = 1.960,00}$$

Se puede observar que el costo total resulta menor que la encontrada por el método de la esquina del noroeste y el método del costo mínimo de la matriz.

2.2.4.4 Método del costo mínimo de la columna

Este método considera para la asignación inicial los costos de la tabla 2.6.

El procedimiento se basa, en asignar el mayor valor posible a la variable (celda) que tenga el mínimo costo en cada una de las columnas del problema bajo estudio. Este método es bastante similar al anterior pero en lugar de hacerse por fila se asigna teniendo en cuenta el menor valor de cada columna.

Aplicando el procedimiento al ejemplo que se viene desarrollando se obtiene lo siguiente:

Ejemplo 2.6

Tabla 2.20 Tabla de transporte para el ejemplo a desarrollar.

ORÍGENES (áreas de cultivo)	DESTINOS (HOTELES)			DISPONIBILIDAD
	1	2	3	
A	12	10	15	80
B	9	12	14	120
F	0	M	0	40
REQUERIMIENTOS	100	90	50	

En la primera columna la variable o celda con el menor costo es F1, en esta celda podría asignarse como máximo 40 unidades y por lo tanto se agota la disponibilidad de esa fila. La tabla quedaría:

Tabla 2.21 Primera asignación.

ORÍGENES (áreas de cultivo)	DESTINOS (HOTELES)			DISPONIBILIDAD
	1	2	3	
A	12	10	15	80
B	9	12	14	120

F	0 40	M -	0 -	(40)	0
REQUERIMIENTOS	(100) 60	90	50		

Para el próximo paso de asignación la matriz de costo queda reducida a las dos primeras filas, valores en rojo, y dentro de esa matriz, en la primera columna se selecciona la celda de mínimo costo que será la B1 con un costo de 9 y en ella se puede asignar como máximo 60 unidades. La tabla ahora quedaría: Ver tabla 2.22.

De esta forma queda eliminada la columna 1 de la tabla y la matriz de costo se reduciría a los elementos de la 1era y 2da fila y de la 2da y 3era columna, cuyos costos se marcan con color rojo. De la matriz reducida el costo mínimo de la primera columna se corresponde con la celda A1 con un valor de 10 y en ella se puede asignar como máximo 80 unidades y de esa forma se elimina la 1era fila de la tabla. Ver tabla 2.23

Como sólo queda una fila en ella se hace la última asignación (celda B2) logrando que la tabla quede balanceada y la SBFI sería: Ver tabla 2.24

Tabla 2.22 Segunda asignación.

ORÍGENES (áreas de cultivo)	DESTINOS (HOTELES)			DISPONIBILIDAD	
	1	2	3		
A	12	10	15	80	
B	9 60	12 -	14 -	(120)	60

F	0 40	M -	0 -	(40)	0
REQUERIMIENTOS	(100)	90	50		
	(60)	-	-		
	0	-	-		

Tabla 2.23 Tercera asignación.

ORÍGENES (áreas de cultivo)	DESTINOS (HOTELES)			DISPONIBILIDAD	
	1	2	3		
A	12	10 80	15	(80)	0
B	9 60	12 -	14 -	(120)	60
F	0 40	M -	0 -	(40)	0
REQUERIMIENTOS	(100)	90	50		
	(60)	-	-		
	0	-	-		

Tabla 2.24 Cuarta y quinta asignación.

ORÍGENES (áreas de cultivo)	DESTINOS (HOTELES)			DISPONIBILIDAD			
	1	2	3				
A	12	10 80	15	(80)	0		
B	9 - 60	12 10 -	14 50 -	(120)	(60)	(50)	0
F	0 40	M -	0 -	(40)	0		
REQUERIMIENTOS	(100)	90	50				

	(60)	(10)	-	
	0	0	-	

Tabla 2.25 Solución Básica Factible Inicial (SBFI), encontrada.

ORÍGENES (áreas de cultivo)	DESTINOS (HOTELES)			DISPONIBILIDAD
	1	2	3	
A	12	10	15	80
	-	80	-	
B	9	12	14	120
	-	10	50	
	60	-	-	
F	0	M	0	40
	40	-	-	
REQUERIMIENTOS	100	90	50	

Esta Solución Básica Factible Inicial (SBFI), es:

$$X_{A2} = 80$$

$$X_{B1} = 60$$

$$X_{B2} = 10$$

$$X_{B3} = 50$$

$$X_{F1} = 40$$

$$CT = 10 \cdot 80 + 9 \cdot 60 + 12 \cdot 10 + 14 \cdot 50 + 0 \cdot 40 = 2.160,00$$

Se puede observar que el costo total resulta menor que la encontrada por el método de la esquina del noroeste y mayor que el del método del costo mínimo de la fila. Este a su vez es igual al del método del costo mínimo de la matriz.

2.2.4.5 Método de aproximación de Vogel.

El método de Vogel según Companys Pascual, R. (1989), Corrons Prieto, L. (1979), Domínguez Machuca J. A. (1990),

Philip, H. (1989) y Sasieni, Y. (1970), es el más eficiente de todos los métodos estudiados hasta el momento, el mismo será explicado a través de un ejemplo.

Para aplicar este método se trabaja con la tabla de costos y requerimientos que se viene trabajando con el fin de seleccionar las siguientes variables básicas. Tabla 2.25.

Primero:

Para cada fila y columna que queda bajo consideración, se calcula la diferencia aritmética entre los dos costos unitarios más pequeños (C_{ij}), si se tiene un empate entre ambos, entonces la diferencia es cero. Ver tabla 2.27.

Segundo:

En la fila o columna que tenga la mayor diferencia se elige la variable que tiene el menor costo unitario, los empates para la mayor de estas diferencias se puede romper de forma arbitraria. Ver tabla 2.28.

Tabla 2.26 Tabla de transporte para el ejemplo en curso.

ORÍGENES (áreas de cultivo)	DESTINOS (HOTELES)			DISPONIBILIDAD
	1	2	3	
A	12	10	15	80
B	9	12	14	120

F	0	M	0	40
REQUERIMIENTOS	100	90	50	

Tabla 2.27 Calculo de las diferencias.

ORÍGENES (áreas de cultivo)	DESTINOS (HOTELES)			DISPONIBILIDAD	Diferencia por filas
	1	2	3		
A	12	10	15	80	2
B	9	12	14	120	3
F	0	M	0	40	0
REQUERIMIENTOS	100	90	50	240	
Diferencias por columnas	9	12	14		

Tabla 2.28 Primera asignación.

ORÍGENES (áreas de cultivo)	DESTINOS (HOTELES)			DISPONIBILIDAD	Diferencia por filas
	1	2	3		
A	12	10	15	80	2
B	9	12	14	120	3
F	0	M	0	(40)	0
			40		
REQUERIMIENTOS	100	90	(50) 10	$X_{F3} = 40$ Elimino fila F	
Diferencias por columnas	9	12	14		

Tercero:

Se encierra en un círculo la mayor de las diferencias seleccionadas y se enmarca en un cuadro el costo menor en esa fila o columna.

Cuarto:

Se realiza la asignación según las capacidades de orígenes y destinos.

Quinto:

La variable con este costo unitario menor se selecciona como la siguiente variable básica y su valor se indica en la esquina inferior derecha de la tabla actual, junto con la fila o columna que se elimina.

La tabla para la siguiente iteración es la misma pero se elimina la fila o columna que se asignó según el origen y el destino, calculando nuevamente las diferencias cuando sufren cambios

los números a los que se refieren. El resto de las asignaciones aparecen en las tablas 2.29, 2.30 y 2.31.

Las variables básicas serán las que se van reflejando en la esquina inferior derecha.

$$X_{A2} = 80$$

$$X_{B1} = 100$$

$$X_{B2} = 10$$

$$X_{B3} = 10$$

$$X_{F3} = 40$$

$$CT = (10)80 + (9)100 + (12)10 + (14)10 + (0)40 = 1.960,00$$

Tabla 2.29 Segunda asignación.

ORÍGENES (áreas de)	DESTINOS (HOTELES)			DISPONIBILIDAD	Diferencia por filas
	1	2	3		
A	12	10	15	80	2
B	9 100	12	14	(120) 20	3
REQUERIMIENTOS	100	90	(50) 10	$X_{B1} = 100$ Elimino columna 1	
Diferencias por columnas	3	2	1		

Tabla 2.30 Tercera asignación.

ORÍGENES (áreas de cultivo)	DESTINOS (HOTELES)		DISPONIBILIDAD	Diferencia por filas
	2	3		
A	10 80	15	(80) 0	5
B	12	14	(120) 20	2
REQUERIMIENTOS	(90) 10	(50) 10	$X_{A2} = 80$ Elimino fila A	
Diferencias por columnas	2	1		

Tabla 2.31 Cuarta y quinta asignación

ORÍGENES (áreas de cultivo)	DESTINOS (HOTELES)		DISPONIBILIDAD
	2	3	
B	12 10	14 10	(120) (20) 0
REQUERIMIENTOS	(90) (10) 0	(50) (10) 0	$X_{B2} = 10$ $X_{B3} = 10$

Si se realiza una comparación entre el costo total obtenido por los cinco métodos, es fácil ratificar lo planteado anteriormente por algunos autores, afirmando que el Método del Costo Mínimo de la Fila y el Método de Vogel son los que más rápidamente convergen al óptimo, es decir, los más eficientes.

Métodos	Costo Total obtenido
---------	----------------------

Esquina del Noroeste	2.360,00
Matriz Mínima de Costo	2.160,00
Costo Mínimo de la Fila	1.960,00
Costo Mínimo de la Columna	2.160,00
Vogels	1.960,00

2.2.5 Búsqueda de la solución óptima en el problema de transporte

Una vez encontrada una Solución Básica Factible Inicial (SBFI), al problema de transporte el próximo paso, siguiendo el algoritmo descrito anteriormente sería probar si la solución es óptima. En caso que no lo sea, habría que hallar una nueva solución, haciendo una nueva iteración.

Se explicarán dos métodos para la búsqueda de una solución óptima: el método de “saltando sobre piedras” (*steppingstone*) y el método *simplex* de transporte, también denominado como método MODI (*ModifiedDistribution*).

2.2.5.1 Método “SALTANDO SOBRE PIEDRAS” (*STEPPING STONE*)

Este método evalúa si alguna de las variables no básicas (celdas vacías) al pasar a ser positiva mejora la solución actual desde el punto de vista de los costos. Para ello asume asignar una unidad a esa celda y hace un balance entre todas las variables básicas que están relacionadas con ella, restando o sumando una unidad. Por tanto tomando los costos dentro del “ciclo” que forman la variable no básica y las básicas asociadas

y tomándolo con su signo según aumente o disminuya en el ciclo, se encontrará un costo total resultante, que si es negativo significa que puede haber una solución mejor pasando la variable no básica bajo análisis a ser una variable básica.

$$CT (VNB) = \sum_i \sum_j C_{ij}$$

Para todo i, j de las variables básicas en el ciclo asociada a la variable no básica bajo análisis.

Criterio de optimalidad.

La solución será óptima si todos los Costos Totales (CT)* Valor Neto Básico (VNB) ≥ 0 .

Si existen CT (VNB) negativos entonces la solución no es óptima y habrá que encontrar una nueva solución. Para ello se darán los siguientes pasos:

- **Selección de la variable que entra a la base.**

Será aquella que tenga el mayor valor negativo de CT (VNB).

- **Selección de la variable que sale de la base.**

De las que disminuyen en el ciclo asociado se selecciona aquella que tenga el menor valor

- **Encontrar la nueva solución.**

Se asigna el valor de la variable que sale a la variable no básica que entra y se hace un balance mediante adición

o sustracción de este valor al resto de las variables que componen el ciclo asociado.

Ejemplo 2.7

Tabla 2.32 Evaluando criterio de optimalidad para A1.

Orígenes (áreas de cultivo)	DESTINOS (HOTELES)			DISPONIBILIDAD
	1	2	3	
A	12 ⁺	10 ⁻	15	80
B	9	12 ⁺	14	120
F	0	M	0	40
REQUERIMIENTOS	100	90	50	

Tabla 2.33 Evaluando criterio de optimalidad para A3.

Orígenes (áreas de cultivo)	DESTINOS (HOTELES)			DISPONIBILIDAD
	1	2	3	
A	12 ⁺	10 ⁻	15 ⁺	80
B	9	12 ⁺	14 ⁻	120
F	0	M	0	40
REQUERIMIENTOS	100	90	50	

Tabla 2.34 Evaluando criterio de optimalidad para F3.

Orígenes (áreas de cultivo)	DESTINOS (HOTELES)			DISPONIBILIDAD
	1	2	3	
A	12 +	10	15 +	80
B	9 +	12	14 -	120
F	0 -	M	0 -	40
REQUERIMIENTOS	100	90	50	

Diagrama de flujo de flujo (red) y costos (azul):

- Flujo de 80 unidades de A a 2.
- Flujo de 60 unidades de B a 1.
- Flujo de 10 unidades de B a 2.
- Flujo de 50 unidades de B a 3.
- Flujo de 40 unidades de F a 1.

Tabla 2.35 Solución no óptima.

ORÍGENES (áreas de cultivo)	DESTINOS (HOTELES)			DISPONIBILIDAD
	1	2	3	
A	12 +	10 80	15 +	80
B	9 60	12 10	14 50	120
F	0 40	M -	0 -	40
REQUERIMIENTOS	100	90	50	

Evaluación del criterio de optimalidad.

CT (A1) = $12 - 9 + 12 - 10 = 5$ (ver tabla 2.31)

CT (A3) = $15 - 10 + 12 - 14 = 3$ (ver tabla 2.32)

CT (F2) = M Las casillas con un costo M no se evalúan pues siempre daría un costo positivo grande, a no ser que en el ciclo asociado halla celdas con costos M también.

CT (F3) = $0 - 14 + 9 - 0 = -5$ (ver tabla 2.34)

Puede verse que una variable no básica F3 tiene CT negativo y por ende esta solución no es óptima.

Decisión de la variable que entra a la base.

Como en este ejemplo sólo hay una variable, F3, con CT negativo esta será la que entra a la base.

Decisión de la variable que sale de la base.

El ciclo asociado a la variable que va a entrar a la base, F3, se muestra en color magenta en la tabla 2.37 y en cada esquina del ciclo aparece un signo que indica si la variable crece o decrece. El criterio implica que debe salir la variable con menor valor de las que decrecen, que en este caso será 40 de la variable F1 que pasará a ser variable no básica (casilla vacía). La nueva solución se muestra en la siguiente tabla: Ver tabla 2.36.

El costo total de esta solución sería:

$$CT = 800 + 900 + 120 + 140 + 0 = 1.960,00$$

Compruebe para esta solución el criterio de optimalidad verá que esta es la solución óptima del problema.

Tabla 2.36 Nueva solución.

ORÍGENES (áreas de	DESTINOS (HOTELES)	DISPONIBILIDAD
-----------------------	-----------------------	----------------

cultivo)	1	2	3	
A	12 -	10 80	15 -	80
B	9 100	12 10	14 10	120
F	0 -	M -	0 40	40
REQUERIMIENTOS	100	90	50	

2.2.5.2 Método Simplex o MODI

Este procedimiento se basa en la utilización de las variables duales del problema de transporte, por lo que se definirá una variable por cada fila de la tabla de transporte (U_i) y una por cada columna (V_j).

El método sigue los siguientes pasos:

- Definir las variables duales U_i y V_j .
- Encontrar el sistema de ecuaciones para las variables duales. Para cada variable básica (celda con valor) se plantea la ecuación:

$U_i + V_j = C_{ij}$ para todo i, j asociado a variables básicas.

Este sistema tendrá $m+n$ incógnitas y $m+n-1$ ecuaciones.

- Encontrar el valor de las variables duales. A partir del sistema de ecuaciones anterior se hace una de las variables igual a cero y se halla el valor del resto de las variables.
- Probar el criterio de optimalidad de la solución actual.

Para cada variable no básica (casilla vacía) evalúe la siguiente ecuación:

$$C_{ij} - U_i - V_j$$

Si todos $C_{ij} - U_i - V_j \geq 0$ entonces la solución es óptima.

Si alguno de los $C_{ij} - U_i - V_j$ es negativo la solución no es óptima y habrá que encontrar una nueva solución, seleccionando como la variable que entra a la base aquella que tenga el $C_{ij} - U_i - V_j$ más negativo.

La decisión de la variable que sale y la iteración es similar a lo visto en el anterior método.

Ejemplo

Tabla 2.37 Definición de las variables duales

Orígenes (áreas de cultivo)	DESTINOS (HOTELES)			DISPONIBILIDAD
	1	2	3	
A	12	10	15	80
B	9	12	14	120
F	0	M	0	40
REQUERIMIENTOS	100	90	50	
	V_1	V_2	V_3	

A la derecha y debajo de la tabla se han definido las variables duales para este problema.

El sistema de ecuaciones sería:

$$U_1 + V_2 = 10$$

$$U_2 + V_1 = 9$$

$$U_2 + V_2 = 12$$

$$U_2 + V_3 = 14$$

$$U_3 + V_1 = 0$$

Hay 6 variables y 5 ecuaciones y hay que hacer una variable igual a cero para hallar la solución. Si $U_2 = 0$, entonces:

Sustituyendo y despejando en las ecuaciones se obtiene:

$$V_1 = 9 \quad U_1 = -2$$

$$V_2 = 12 \quad U_2 = 0$$

$$V_3 = 14 \quad U_3 = -9$$

Probando el criterio de optimalidad para las variables no básicas:

$$A1: C_{A1} - U_1 - V_1 = 12 - (-2) - 9 = 5$$

$$A3: C_{A3} - U_1 - V_3 = 15 - (-2) - 14 = 3$$

$$F2: C_{F2} - U_3 - V_2 = M - (-9) - 12 = M$$

$$F3: C_{F3} - U_3 - V_3 = 0 - (-9) - 14 = -5$$

Como uno de los valores, el asociado a la celda F3 es negativo la solución actual no es la óptima y habrá que hallar una nueva solución. Para determinar la variable que sale y la nueva solución se siguen los mismos pasos que en el método anterior, o sea, se selecciona el ciclo asociado a la variable que entra con las actuales variables básicas (celdas llenas), el que se muestra en la tabla inicial con color magenta, se selecciona de las variables básicas dentro del ciclo que disminuyen cuando la que va a entrar aumenta, la que tenga el menor valor, en el ejemplo la celda F1 con 40 y este será el valor que toma la variable que entra, haciéndose el balance en todo el ciclo asociado.

La nueva solución sería:

Tabla 2.38 Nueva solución.

ORÍGENES (áreas de	DESTINOS (HOTELES)	DISPONIBILIDAD
-----------------------	-----------------------	----------------

cultivo)	1	2	3	
A	12	10	15	80
	-	80	-	
B	9	12	14	120
	100	10	10	
F	0	M	0	40
	-	-	40	
REQUERIMIENTOS	100	90	50	

La que es idéntica a la encontrada por el método anterior y compruebe aplicando el Método MODI que esta solución es la óptima del problema.

2.2.6 Complicaciones al modelo de transporte y su solución.

2.2.6.1 Maximizar.

Si en la tabla de transporte en lugar de costos se tuviera ganancias el objetivo sería maximizar en lugar de minimizar. Para este caso lo que se hace es multiplicar todos los valores de ganancia de la tabla por -1 y se mantiene todo lo visto hasta aquí. Si se emplea el método de la matriz mínima para la búsqueda de la SBF1, entonces los mejores valores serían los más negativos

El criterio de optimalidad con este cambio en los signos no sufre ninguna variación, o sea la solución será óptima si todos los $C_{ij} - U_i - V_j \geq 0$, en caso de emplearse el Método MODI. Se mantiene los mismos criterios para seleccionar las variables que salen y entran a la base.

2.2.6.2 Solución óptima múltiple.

Habrá solución múltiple o alternativa óptima en el problema de transporte si se llega a una solución que cumple el criterio de optimalidad (todos los $C_{ij} - U_i - V_j \geq 0$). Si existen celdas cuyo valor de todos los $C_{ij} - U_i - V_j = 0$, entonces el problema tiene solución múltiple y se encuentra entrando a la base aquella variable que tenga esta condición, o sea que su $C_{ij} - U_i - V_j = 0$

Suponga que en el ejemplo que se viene desarrollando el costo de la celda B1 cambia de 9 a 14.

Tabla 2.39. Celda B1 cambia de 9 a 14.

ORÍGENES (áreas de cultivo)	DESTINOS (HOTELES)			DISPONIBILIDAD
	1	2	3	
A	12 -	10 80	15 -	80
B	14 100	12 10	14 10	120
F	0 -	M -	0 40	40
REQUERIMIENTOS	100	90	50	

Evaluando las celdas vacías por el procedimiento “saltando sobre piedras, se tendría:

$$CT (A1) = 12-14+12-10 = 0$$

$$CT (A3) = 15-10+12-14= 3$$

$$CT (F1) = 0-14+14-0= 0$$

$$CT (F2) = M$$

Por lo tanto esta solución cumple con el criterio de optimalidad, pues todos los CT evaluados para las variables no básicas

(celdas vacías) son mayores o iguales a cero, pero el hecho que dos de ellos, CT (A1) y CT (F1) sean cero implica que el problema tiene solución múltiple. Para hallar otra de las soluciones se introduce una de estas variables a la base y se continúa el proceso de búsqueda de una nueva solución.

En ambos casos el costo total de la solución óptima es de 2.460,00.

2.2.6.3 Solución degenerada.

La solución del problema de transporte será degenerada si una variable básica tiene valor cero. La degeneración en este caso puede presentarse desde la misma búsqueda de la SBFI o en el proceso iterativo. En el último caso se presentará cuando de las variables básicas que están en el ciclo asociado disminuyendo hay 2 que tienen el mismo valor mínimo, en cuyo caso una de ellas pasara a ser no básica, transfiriendo su valor a la variable que entra y la otra se queda en la base pero con valor cero.

Tabla 2.40 Ejemplo de solución degenerada.

ORÍGENES (áreas de cultivo)	DESTINOS (HOTELES)			DISPONIBILIDAD
	1	2	3	

A	12 80	10 -	15 -	80
B	14 20	12 90	14 10	120
F	0 -	M -	0 40	40
REQUERIMIENTOS	100	90	50	

Ejemplo 2.8

Tabla 2.41 Datos para el ejemplo de solución degenerada.

ORÍGENES (ALMACENES)	DESTINOS (TIENDAS)			DISPONIBILIDAD
	1	2	3	
A	10 75	16 -	25 -	75
B	18 25	15 50	14 0	75
F	0 -	M -	0 30	30
REQUERIMIENTOS	100	50	30	

En el ejemplo anterior se ha buscado la Solución Básica Factible Inicial (SBFI), empleando el método de la esquina del noroeste. Se inicia asignando 75 unidades en la celda A1, después se baja a la celda B1 y se asignan 25 unidades agotándose la columna y se mueve a la celda B2 en la que puede asignarse 50 unidades, pero se elimina simultáneamente la disponibilidad de la fila y los requerimientos de la columna. ¿Cómo continuar con el procedimiento? Cuando

esto ocurre a una de las celdas contiguas, en este caso B3 o F2 se le asigna un valor de cero y se continúa la asignación. En el ejemplo se seleccionó la celda B3 por tener menor costo y se le asignó cero y se culminó asignando 30 a la celda F3. La variable X_{B3} es básica con valor cero y esta solución es degenerada.

2.2.7 Ejercicio Resuelto.

Una Empresa tiene dos fábricas (A y B) con capacidad disponible para la fabricación de 3 tipos de artículos (1,2 y 3). Las capacidades de cada fábrica, en artículos por semana, son de 60 y 40 artículos para la fábrica A y B respectivamente. Existe el compromiso de entregar 50 artículos del tipo 1 y al menos 20 del tipo 3 cada semana. La capacidad restante será para producir artículos tipo 2 o sobre cumplir el compromiso de artículos tipo 3. En la siguiente tabla se muestra la ganancia unitaria que obtiene cada fábrica por la producción de cada tipo de artículo.

Tabla 2.42 Ganancia unitaria de cada fábrica.

FABRICAS	PRODUCTOS		
	1	2	3
A	5	7	6
B	3	2	4

La dirección de la Empresa desea conocer cuántos artículos de cada tipo debe producir cada fábrica para maximizar las ganancias totales.

Solución

Este es un problema de plan de producción, pero puede ser resuelto aplicando el modelo de transporte, considerando las

fábricas como orígenes y los artículos como destino. Las capacidades de las fábricas pueden considerarse como la disponibilidad de productos y las necesidades o compromisos como los requerimientos. La capacidad total es de 100 unidades por semana, mientras que la demanda comprometida es de 70, por lo que la capacidad restante debe decidirse si se dedica a la producción de artículos tipo 2 o 3, o sea, pueden producirse 30 artículos tipo 2 o 30 artículos más del tipo 3. Si planteamos el problema por un modelo de transporte este sería desbalanceado, ya que las necesidades serían de 130 unidades y las disponibilidades de 100 por lo que habría que agregar un origen ficticio. La tabla de transporte quedaría entonces de la siguiente manera:

Tabla 2.43 Tabla balanceada de transporte.

FABRICAS	PRODUCTOS				DISPONIBILIDAD
	1	2	3	3A	
A	5	7	6	6	60
B	3	2	4	4	40
FICTICIA	- M	0	- M	0	30
NECESIDAD	50	30	20	30	

Note que en las celdas del origen ficticio de las columnas del artículo 1 y 3 se ha situado una ganancia de $-M$ para obligar que sean cero en la solución óptima y de esta manera cumplir con los compromisos de entrega de estos dos productos.

Como lo que se desea es maximizar habrá que cambiar los signos que aparecen en la tabla de ganancias mostrada anteriormente y entonces la tabla de transporte será:

Tabla 2.44 Cambio de signos a los valores de ganancia.

FABRICAS	PRODUCTOS				DISPONIBILIDAD
	1	2	3	3A	
A	-5	-7	-6	-6	60
B	-3	-2	-4	-4	40
FICTICIA	M	0	M	0	30
NECESIDAD	50	30	20	30	

Búsqueda de la Solución Básica Factible Inicial (SBFI).

La solución básica factible inicial utilizando el procedimiento de la matriz mínima, se muestra en la tabla 2.45

El procedimiento seguido conlleva a una asignación en una celda que tiene valor M y por ende ya se sabe que esta no puede ser una solución óptima.

Si se hubiera aplicado la Regla de la Esquina del Noroeste la Solución Básica Factible Inicial (SBFI) hubiera sido como se muestra en la tabla 2.46, y note que en este caso particular esta SBFI es mejor que la anterior, pero es una solución degenerada, pues una de las variables básicas (B, 3A) tiene valor cero.

Tabla 2.45 Solución Básica Factible Inicial (SBFI), utilizando el procedimiento del costo mínimo de la matriz.

FABRICAS	PRODUCTOS	DISPONIBILIDAD
----------	-----------	----------------

Programación de la Producción

	1	2	3	3A	
A	-5	-7	-6	-6	(60), 30, 10, 0
	-	30	20	10	
B	-3	-2	-4	-4	(40), 20
	20	-	-	20	
FICTICIA	M	0	M	0	30
	30	-	-	-	
NECESIDAD	50	(30), 0	(20), 0	(30), 20, 0	

Tabla 2.46 Solución Básica Factible Inicial (SBFI), aplicando el método del costo mínimo de la fila

FABRICAS	PRODUCTOS				DISPONIBILIDAD
	1	2	3	3A	
A	-5	-7	-6	-6	60
	-	30	20	10	
B	-3	-2	-4	-4	40
	20	-	-	20	
FICTICIA	M	0	M	0	30
	30	-	-	-	
NECESIDAD	50	30	20	30	

Tabla 2.47 Solución Básica Factible Inicial (SBFI), aplicando el método del costo mínimo de la columna.

FABRICAS	PRODUCTOS				DISPONIBILIDAD
	1	2	3	3A	
A	-5	-7	-6	-6	60

	-	10	-	0	
	50	-	-	-	
B	-3	-2	-4	-4	40
	-	20	20	-	
FICTICIA	M	0	M	0	30
	-	-	-	30	
NECESIDAD	50	30	20	30	

Tabla 2.48 Solución Básica Factible Inicial (SBFI), aplicando el método de la esquina noroeste.

FABRICAS	PRODUCTOS				DISPONIBILIDAD
	1	2	3	3A	
A	-5	-7	-6	-6	60
	50	10	-	-	
B	-3	-2	-4	-4	40
	-	20	20	0	
FICTICIA	M	0	M	0	30
	-	-	-	30	
NECESIDAD	50	30	20	30	

Prueba del criterio de solución óptima.

Utilizando el método simplex de transporte se evaluará si la SBFI es óptima o no (ya sabemos que no es óptima). Para ello se definen las variables duales del problema para cada fila y cada columna como se muestra en la tabla 2.49.

Planteando el sistema de ecuaciones se tendrá:

$$U_1 + V_2 = -7$$

$$U_1 + V_3 = -6$$

$$U_1 + V_4 = -6$$

$$U_2 + V_1 = -3$$

$$U_2 + V_4 = -4$$

$$U_3 + V_1 = M$$

Haciendo $U_1 = 0$, sustituyendo y despejando se obtendrá:

$$U_1 = 0 \quad V_1 = -5 \quad V_4 = -6$$

$$U_2 = 2 \quad V_2 = -7$$

$$U_3 = M \quad V_3 = -6$$

Tabla 2.49 Definición de las variables duales para el método MODI

FABRICAS	PRODUCTOS				DISPONIB.	
	1	2	3	3A		
A	-5	-7	-6	-6	60	u_1
B	-3	-2	-4	-4	40	u_2
FICTICIA	M	0	M	0	30	u_3
NECESIDAD	50	30	20	30		
	V_1	V_2	V_3	V_4		

Evaluando el $C_{ij} - U_i - V_j$ de cada variable no básica (celda vacía):

$$11: -5 - 0 + 5 = 0$$

$$22: -3 - 2 + 7 = 2$$

$$23: -4 - 2 + 6 = 0$$

$$F2: 0 - M + 7 = -M$$

$$F3: M - M + 6 = 6$$

$$F4: 0 - M + 6 = -M$$

Como puede verse hay 2 variables no básicas con $C_{ij} - U_i - V_j$ negativo, por lo que la solución evaluada no es óptima y habrá que hallar una nueva solución.

Para hacer la iteración:

Seleccionar la variable que entra. Será la que tenga el $C_{ij} - U_i - V_j$ más negativo, en este caso pudiera ser F2 ó F4 con $-M$. Para el ejemplo se seleccionará F4.

Seleccionar la variable que sale. En el ciclo asociado a la variable que entre se selecciona de las que disminuye la más pequeña. Como puede verse en el ciclo dibujado en la tabla 2.48 la variable que llega a cero primero cuando F4 aumenta, es B4 con un valor de 20, por lo que será la variable que sale de la base.

Hacer la nueva iteración. Pasa a ser variable básica F4 con un valor de 20 y pasa a no básica B4, haciéndose el ajuste a todas las variables del ciclo y la nueva solución se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 2.50 La nueva iteración.

FABRICAS	PRODUCTOS				DISPONIB
	1	2	3	3A	
A	-5	-7	-6	-6	60
B	-3	-2	-4	-4	40
FICTICIA	M	0	M	0	30
NECESIDAD	50	30	20	30	

Nuevamente se debe probar si la solución encontrada es óptima o no (note que todavía hay asignación en una celda con costo M por lo que esta solución tampoco es óptima).

Planteando el sistema de ecuaciones de las variables cuales se tendrá:

$$U1 + V2 = -7$$

$$U1 + V3 = -6$$

$$U1 + V4 = -6$$

$$U2 + V1 = -3$$

$$U3 + V1 = M$$

$$U3 + V4 = 0$$

Haciendo $U1=0$ y despejando el sistema se tendrá:

$$U1 = 0 \quad V1 = M$$

$$U2 = -M \quad V2 = -7$$

$$U3 = 6 \quad V3 = -6$$

$$V4 = -6$$

Evaluando las casillas vacías se obtendrá

$$A1: -5 -0 -M = -M$$

$$B2: -4 +M +7 = M$$

$$B3: -6 +M +6 = M$$

$$B4: -6 +M +6 = M$$

$$F3: M -6 +6 = M$$

$$F4: 0 -6 + 6 = 0$$

La única variable con $Cij -Ui -Vj$ negativo es $A1$ que será la variable que entra a la base. En el ciclo asociada a esta variable y que aparece en azul en la tabla anterior, hay dos variables que llegan simultáneamente a cero cuando se incrementa el valor de $A1$, y que son $F1$ y $A4$. Como es necesario eliminar la variable $F1$ como básica se selecciona esta para que salga de la base y la variable $A2$ sigue siendo básica pero con valor cero, o sea la próxima solución ¡será una solución degenerada! Haciendo la iteración se encontrará la siguiente tabla:

Tabla 2.51 Tabla óptima.

FABRICAS	PRODUCTOS				DISPO NIBILI
	1	2	3	3A	
A	-5	-7	-6	-6	60
	10	30	-	0	
	-	-	20	-	
B	-3	-2	-4	-4	40
	40	-	-	-	
FICTICIA	M	0	M	0	30
	-	-	-	30	
NECESIDAD	50	30	20	30	

Se debe nuevamente evaluar si esta es la solución óptima del problema. Para ello se encuentra el sistema de ecuaciones de las variables duales y el valor de estas variables, que serán:

$$\begin{aligned}
 U_1 &= 0 & V_1 &= -5 \\
 U_2 &= 2 & V_2 &= -7 \\
 U_3 &= 6 & V_3 &= -6 \\
 & & V_4 &= -6
 \end{aligned}$$

Evaluando los $C_{ij} - U_i - V_j$ de las celdas vacías queda:

$$22: -2 -2 +7 = 3$$

$$23: -4 -2 +6 = 0$$

$$24: -4 -2 +6 = 0$$

$$F1: M -6 +5 = M$$

$$F2: 0 -6 +7 = 1$$

$$F3: M -6 +6 = M$$

Como puede verse no hay ningún $C_{ij} - U_i - V_j$ negativo, por lo que la solución actual es la óptima, pero hay dos variables no básicas cuyos $C_{ij} - U_i - V_j = 0$ ¡por lo que el problema tiene solución múltiple!

Estas soluciones pueden encontrarse entrando la variable 23 ó 24 y haciendo una nueva iteración.

Interpretación de la solución.

De la tabla óptima se deduce que:

- La fábrica A producirá 10 artículos de tipo 1, 30 de tipo 2 y 20 de tipo 3.
- La fábrica B producirá 40 artículos de tipo 1
- La ganancia máxima obtenida con este plan de producción asciende a \$ 500.

2.2.8 Problemas propuestos para solución.

1.- La Empresa de Alimentos de Matanzas tiene que garantizar la entrega de dulces para la venta en las playas del Tennis y La Caridad. Para ello dispone de 3 panaderías que producirán el dulce (A,B,C) , las cuales tienen una capacidad de producción diaria de 100, 120 y 80 tártaras de 100 unidades, a un costo, en \$/tártara, de \$ 15, \$ 18 y \$ 20 para A, B y C respectivamente.

Los costos de transportación, en \$/tártara, y los requerimientos, en tártaras por día, se muestran en la siguiente tabla:

PANADERIAS	PLAYAS	
	Tennis	La Caridad
A	\$ 5	\$ 8
B	\$ 8	\$ 10
C	\$ 7	\$ 4
REQUERIMIENTO (Tártaras 100 u)	120	130

Se quiere utilizar toda la capacidad de la panadería C.

Determine cuál será el plan de producción diaria de dulces de cada panadería, cuanto enviaría cada una a cada playa y cuál sería el costo total para la Empresa.

2.- La producción de hormigón necesaria para la construcción de 3 hoteles en Varadero (A, B, C) es asumida por tres plantas de producción de hormigón. Los requerimientos de hormigón para las tres construcciones son de 15, 18 y 20 toneladas de hormigón para A, B y C respectivamente. Cada planta tiene una capacidad de producción de 25 toneladas cada una pero el costo de producción por toneladas es de 15, 16 y 18 (cientos de pesos) para la planta. 1, 2, y 3 respectivamente. Los costos de transportación por tonelada (en cientos de pesos) desde cada planta hasta cada construcción se muestra en la siguiente tabla:

PLANTAS	CONSTRUCCIONES		
	A	B	C
1	2	3	2
2	4	3	5
3	-	4	3

Desde la planta 3 no puede enviarse hormigón a la construcción A. Se quiere aprovechar en su totalidad la capacidad de la planta 1.

Solucione el problema e interprete la solución óptima.

3.- La Empresa de Cítricos de Jagüey tiene 2 puntos (A y B) desde donde se envían embarques de fruta fresca hacia los puertos de Matanzas y Cienfuegos. La capacidad disponible en cada punto es de 50 y 70 toneladas cada semana.

La capacidad de embarque de los puertos, en toneladas por semana, es de 90 y 60 toneladas para Matanzas y Cienfuegos respectivamente.

Los costos de envío, en \$/ton, desde cada punto a los puertos se muestran en la siguiente tabla:

PUNTOS DE ENVIO	PUERTOS DE EMBARQUE	
	Matanzas	Cienfuegos
A	12	15
B	16	14

Se quiere utilizar toda la capacidad disponible del puerto de Cienfuegos.

Bajo estas condiciones:

- a) Plantee este problema por el modelo de transporte.
- b) Halle una solución básica factible inicial
- c) Encuentre la solución óptima e interprétela.

4.- La Empresa de Ron está elaborando su plan de producción para el próximo trimestre para las 3 unidades de producción que tiene subordinadas (A, B, C).

Esta contratada la entrega de 30, 40 y 60 mil litros de ron refino para los meses de abril, mayo y junio respectivamente. La ganancia estimada, en miles de pesos, por la entrega de mil litros es diferente por mes y por unidad y se muestra en la siguiente tabla:

UNIDADES	MESES
----------	-------

	ABRIL	MAYO	JUNIO
A	8	10	12
B	10	9	12
C	9	7	10

Las unidades A y B tienen la capacidad de producción limitada a 50 mil litros cada una en el trimestre, mientras que C tiene suficiente capacidad para poder asumir cualquier necesidad. Por problemas de mantenimiento programado, no se debe asignar producción a la unidad A en Junio..

- Plantee un modelo de transporte para solucionar este problema.
- Halle una solución inicial para el problema.
- Halle la solución óptima para este problema e interprétela.

5.- La Empresa Divep de Matanzas, necesita transportar desde 3 de sus almacenes (O_1 , O_2 y O_3) mercancías para 3 de sus puntos de venta (D_1 , D_2 y D_3), se conoce que su capacidad de transportación de cada almacén de 2, 5 y 9 toneladas respectivamente y la demanda de los puntos de venta es de 2, 4 y 8 respectivamente. Se conoce además que los costos de envío (\$ / unidad) son los siguientes:

Orígenes	Costos de envío (\$/unidad)		
	D₁	D₂	D₃
O₁	8	2	3
O₂	6	1	6
O₃	4	7	5

- Establezca la matriz de transporte para el siguiente problema.

- b. Encuentre la SBF1.
- c. Asegure que la solución encontrada es óptima utilizando el método MODI y el Saltando sobre piedras.
- d. ¿Cuál es el costo total de la solución óptima?

6.- La Empresa de Productos Lácteos está conformado su Plan de Producción para el próximo trimestre de yogurt natural. Las entregas comprometidas son de 20, 15 y 25 toneladas para Abril, Mayo y Junio respectivamente. Para realizar la producción se cuenta con 3 unidades (A, B y C) cuyas capacidades de producción de yogurt natural son de 20, 25 y 30 toneladas respectivamente para el próximo trimestre. Se conoce que la ganancia que se obtiene por cada tonelada en cada unidad y para cada mes son los siguientes:

UNIDADES	MESES		
	Abril	Mayo	Junio
Unidad A	1200	1500	1650
Unidad B	1300	1450	1600
Unidad C	1000	1500	1700

La empresa desea que se utilice totalmente la capacidad de la unidad B.

- a. Determine que cuota de producción de yogurt debe asignarse a cada unidad en cada mes para maximizar las ganancias.

7.- La producción de hormigón necesaria para la construcción de 3 hoteles en Varadero (A, B y C) son asumidas por tres plantas de producción de hormigón. Los requerimientos de hormigón para las tres construcciones son de 15, 18 y 20 toneladas para A, B y C respectivamente. Cada planta tiene una capacidad de producción de 25 toneladas cada una, pero

el costo de producción por toneladas es de 15, 16 y 18 (cientos de pesos) para la planta 1, 2 y 3 respectivamente. Los costos de transportación por toneladas (en cientos de pesos) desde cada planta hasta cada construcción se muestra en la siguiente tabla:

Plantas	Hoteles		
	A	B	C
1	2	3	2
2	4	3	5
3	5	4	3

Determine qué cantidad de hormigón debe enviarse desde cada planta a cada construcción para minimizar los costos totales.

8.- Abatur quiere elaborar el plan de distribución de la carne de cerdo para cada quincena que garantice el costo mínimo, para ello cuenta con dos puntos de distribución A y B de los que hay que enviar el producto a 3 hoteles (1, 2 y 3). La disponibilidad en toneladas en los puntos de distribución es de 20 y 15 toneladas y la necesidad para la quincena de cada hotel es de 10, 25 y 15 toneladas respectivamente; se hace necesario garantizar todo el suministro del hotel 3 y se conoce que los costos de transportación son los siguientes:

Puntos de Distribución	Hoteles		
	1	2	3
A	16	14	18
B	17	16	19

- Plantee la tabla de transporte para este problema.
- Encuentre la SBF1.

- c. Pruebe que la solución encontrada es la solución óptima.
- d. Diga cuál será el costo total de la misión.

9.- La *AbleCompany* tiene tres plantas cada una de las cuales puede fabricar productos de la compañía. Los precios de venta son independientes de la planta de origen, pero los costos variables difieren debido a las distintas edades de las maquinarias y a que los costos de manos de obra también difieren. La *AbleCompany* quiere saber qué cantidad de cada producto debe fabricar en cada planta. Las capacidades semanales y las demandas de venta se dan a continuación.

Planta	Capacidad	Producto	Demanda
1	500	Estándar	1 500
2	3 000	De lujo	2 000
3	3 500	De súper lujo	2 500

La contribución neta (precio–costo variable) para cada planta y la combinación de productos es (en \$/unidad):

Planta	Estándar	De lujo	De súper lujo
1	4	7	5
2	6	8	7
3	5	4	4

- a. Con el método de transporte encuentre el plan que maximice la contribución.
- b. ¿Cuál es la contribución total por semana?

2.3. Método de los Índices

El método de programación de los índices, es un método fácil y simple de emplear, ha sido aplicado con resultados positivos en la asignación de las cargas a los puestos de trabajo en talleres que trabajan por órdenes (sobre pedidos). En el mismo, uno o más trabajos pueden ser asignados a un puesto de trabajo, la decisión está en dependencia de su capacidad de tiempo disponible, es decir, en la disponibilidad total de tiempo para ejecutar los trabajos.

Este método no es puramente matemático, pues requiere en su análisis valoraciones subjetivas. La base de este es comparar el puesto de trabajo que necesita menos tiempo para hacer cada trabajo con los restantes puestos donde pueda ejecutarse. La finalidad del mismo es elaborar el mayor número de artículos en los mejores puestos de trabajo y asignar la sobrecarga a los mejores entre los restantes.

Según Fundora Miranda (1987), para poder aplicar el método se requiere:

- Acumular cierta cantidad de trabajos (artículos o piezas) antes de realizar la programación, mientras mayor sea el número de trabajos, mayor será el ahorro que se puede esperar de esta programación.
- Los trabajos se deben disponer en una tabla, que contenga la información del gasto de trabajo i en cada puesto de trabajo j que tenga igual posibilidad de ejecución. Al final de la tabla para cada puesto de trabajo debe aparecer el tiempo total disponible.
- Que el tiempo disponible que tenga cada puesto de trabajo sea menor que la carga de los trabajos en el mismo.

Según las modificaciones realizadas al método de los índices por Medina León, A. et. al. (2009), con el fin de hacer más

racional su automatización, el método se aplica según el algoritmo que se muestra a continuación, acompañado de un ejemplo para su mejor comprensión.

Algoritmo para la aplicación del Método de los Índices:

Se parte del supuesto que cada puesto puede asumir varias tareas siempre que su fondo de tiempo lo permita y que una vez comenzada una tarea por un puesto de trabajo, debe ser ejecutada íntegramente por él, por lo que resulta factible la aplicación del método de los Índices.

1. Comparar la capacidad de cada equipo con las horas requeridas de cada tarea.
2. Anular las tareas que sobrepasen la capacidad del equipo correspondiente.
3. Asignar aquellos trabajos que posean una única posibilidad de ejecución.
4. Luego de cada asignación, se realiza un balance de capacidad.
5. Siempre que queden tareas con una sola posibilidad de ejecución se prioriza.
6. Se calcula el valor de delta (Δ) para cada fila.

Para calcular delta:

- Se divide cada valor de la fila por el menor número que la integra, siendo estos cocientes los índices, los cuales se colocan en la casilla que corresponde.
 - Delta = diferencia entre los dos índices más pequeños de cada fila.
7. Se calcula el valor de delta prima (Δ')

Para calcular delta prima:

- Es la diferencia entre los dos números asociados a los dos índices más pequeños de cada fila, multiplicado por su valor de delta.
8. Seleccionar el mayor valor de delta y asignar el valor que tenga índice = 1 en la fila.
 9. Si existen empate en los delta, se busca el mayor delta prima y se asigna el valor que tenga índice = 1
 10. Siempre que se asigna el valor correspondiente al índice = 1, se recalculan los índices, delta y delta prima.
 11. Si existe empate en delta y también en delta prima, entonces, se calculará un nuevo delta prima pero en lugar de restar los dos números más pequeños, se restarán el primero y el tercero más pequeño, seleccionando igualmente el mayor delta prima resultante.

Nota: Recuerde que siempre que se realiza una asignación, se ajusta capacidad y se balancea.

Tabla de datos:

Órdenes de Trabajo	MÁQUINAS			
	M-1	M-2	M-3	M-4
A-1	<u>50</u>	<u>60</u>	<u>45</u>	20
A-2	15	8	12	16
A-3	-	10	-	-
A-4	12	16	14	18
A-5	20	23	32	<u>35</u>
A-6	-	-	8	-
A-7	8	10	34	15
A-8	30	32	24	25
Capacidad disponible (Horas)	40	40	35	30

2.3.1. Ejercicio resuelto para la comprensión del método de los índices.

Metodología de asignación

En un combinado cárnico de la localidad, en un período reciente, se desean asignar 8 órdenes de trabajo, las cuales deben ser ejecutadas en 4 máquinas pero en tiempos diferentes como lo muestra la tabla siguiente.

Además se conoce la capacidad disponible existente de cada puesto de trabajo.

Se comienza el procedimiento y se compara cada tiempo de elaboración con la capacidad existente y se descarta aquellas órdenes de trabajo que requieren una duración mayor que la capacidad disponible; aunque sean factibles de manera tecnológica. Por este procedimiento son eliminadas las combinaciones tecnológicas: A-1 en M-1, A-1 en M-2, A-1 en M-3, A-5 en M-4 y queda solamente la máquina M-4 como única posibilidad de asignación para A-1.

Se asignan a continuación aquellas máquinas que poseen una sola orden de trabajo (A-1, A-3 y A-6 a las máquinas M-4, M-2 y M-3 respectivamente) y por lo tanto será necesario actualizar la capacidad existente como lo muestra la tabla siguiente.

Órdenes de Trabajo	MÁQUINAS			
	M-1	M-2	M-3	M-4
A-1	-	-	-	20*
A-2	15	8	12	<u>16</u>
A-3	-	10*	-	-
A-4	12	16	14	<u>18</u>

A-5	20	23	<u>32</u>	-
A-6	-	-	8*	-
A-7	8	10	<u>34</u>	<u>15</u>
A-8	30	<u>32</u>	24	<u>25</u>
Capacidad disponible (Horas)	40	40	35	30
		-10	-8	-20
		30	27	10

Una vez actualizadas las capacidades se procede a buscar para cada orden de trabajo la máquina más eficiente; es decir, la de menor costo para ejecutar la tarea. Esta selección se realiza sobre la base de los tiempos por resultar un dato más fácil de obtener. Se divide el tiempo de cada máquina entre el menor y se obtiene así un índice que será igual a 1 para las máquinas más eficientes y mayor que 1 para las restantes.

$$I_{ij} = \frac{C_{ij}}{C_{jmin}} = \frac{T_{ij}}{T_{jmin}}$$

Donde:

- I_{ij} = Índice obtenido para la orden de trabajo "j" en la máquina "i"
- C_{ij} ; T_{ij} = Costo o tiempo de elaboración requerido para la orden de trabajo "j" en la máquina "i", expresado en unidades monetarias o de tiempo respectivamente.
- C_{jmin} , T_{jmin} = Costo o tiempo de elaboración requerido por la mejor máquina para ejecutar la tarea, expresado en unidades monetarias o de tiempo respectivamente.

Una vez calculado los índices se procede a calcular los valores de Delta, que es el resultado de hallar la diferencia entre los dos índices menores obtenidos. Ver la tabla siguiente.

Órdenes de	MÁQUINAS
-------------------	-----------------

Trabajo	M-1	M-2	M-3	M-4
A-2	15 (1,87)	8 (1)*	12 (1,5)	0,50
A-4	12 (1)	16 (1,33)	14 (1,16)	0,16
A-5	20 (1)*	<u>23 (1,15)</u>	-	0,15
A-7	8 (1)	10 (1,25)	-	0,25
A-8	30 (1,25)	-	24 (1)	0,25
Capacidad disponible (Horas)	40 -20 20	30 -8 22	27	

La primera orden asignada a una máquina será aquella que posea un valor de Delta mayor (A-2 con $\Delta=0.50$), y se asignará la orden de trabajo en aquel equipo que posee un índice menor (M-2).

Luego de haber realizado una asignación, siempre se deberá proceder a ajustar las capacidades y eliminar aquellas combinaciones de máquinas – órdenes de trabajo no factibles por no existir las capacidades requeridas.

Se actualizan las capacidades y se asigna la orden de trabajo A-5 a la máquina M-1, como única posibilidad de asignación. Los resultados se muestran en la tabla siguiente.

Luego de hallar los valores de Delta, existe una igualdad entre los mismos; se procede a calcular Delta Prima; para este cálculo se determina la diferencia en unidades monetarias o de tiempo entre los dos valores de costo o tiempo mejores para cada orden de trabajo (los mismos que provocaron Delta) y se multiplica por Δ , es decir:

$$\Delta' = \Delta \cdot (T_j \text{ min} + 1 - T_j \text{ min})$$

$$\Delta' = \Delta \cdot (C_j \text{ min} + 1 - C_j \text{ min})$$

Órdenes de Trabajo	MÁQUINAS			DELTA	
	M-1	M-2	M-3	Δ	Δ'
A-4	12 (1)*	16 (1,33)	14 (1,16)	0,16	0,32
A-7	8 (1)*	10 (1,25)	-	0,25	0,50
A-8	30 (1,25)	-	24 (1)*	0,25	1,50
Capacidad disponible (Horas)	20	22	27		
	-8		-24		
	12		3		
	-12				
	0				

Correspondería ahora asignar la orden de trabajo A-8 teniendo en cuenta el mayor valor de Delta Prima a la máquina M-3, por ser la de menor índice.

Posteriormente serán asignadas las órdenes de trabajo (A-7 y A-4 a la máquina M-1), y se tiene en cuenta su capacidad disponible.

De existir un empate en los valores de Delta Prima, una solución pudiera ser, aplicar el mismo criterio; pero ahora entre el menor y el tercer tiempo de cada trabajo ordenado en sentido creciente, y se decide igualmente por el mayor valor de Delta Dos Primas. La asignación final resulta:

Máquinas	Órdenes de Trabajo	Capacidad utilizada (horas)	Capacidad disponible (horas)	% de aprovechamiento de la Capacidad
M-1	A-4, A-5, A-7	40	40	100
M-2	A-2, A-3	18	40	45

M-3	A-6, A-8	32	35	91,4
M-4	A-1	20	30	66,6
TOTAL		110	145	75,8

2.4. Preguntas de autocontrol

1. ¿Cuál es el objetivo que se persigue en los momentos de asignación, secuenciación y temporización dentro de la programación de la producción?
2. Mencione los métodos más factibles para realizar la asignación, la secuenciación y la temporización.
3. Mencione las condiciones de aplicación de cada método.

2.5. Problemas propuestos

1.- En una carpintería perteneciente a la empresa "Gardis," de Matanzas, se fabrican muebles para la exportación. Los mismos requieren de 6 pasos de trabajo como máximo para su confección.

Los tiempos de fabricación de cada tipo de mueble en cada paso de trabajo se exponen a continuación:

Trabajo	Puestos de trabajo			
	P1	P2	P3	P4
1	11	13	15	14
2	6	8	20	---
3	22	12	30	14
4	26	24	40	20
5	16	17	25	---
6	22	24	10	25

- a. Se desea realizar la asignación de los distintos trabajos a los diversos puestos, de forma que se garanticen los menores tiempos de procesamiento, se conoce además que el fondo de tiempo disponible de cada puesto de trabajo es de 50 horas y se les puede asignar varias tareas.

2.- Se tienen cinco máquinas (A, B, C, D, E) y siete trabajos, los mismos deben ser realizados en dichas máquinas pero con tiempos diferentes como lo indica la tabla siguiente.

Trabajos	A	B	C	D	E
1	8	15	20	14	12
2	4	10	15	3	14
3	20	12	35	27	16
4	-	30	-	-	-
5	16	20	18	19	22
6	22	26	25	15	30
7	30	8	10	35	25
Horas disponibles	60	40	30	50	40

- a. Realice la asignación de los trabajos de manera indivisible, a las diferentes máquinas.
- b. ¿Cuál será el % de utilización de cada máquina?

3.- Con la intención de aplicar el método de los índices, en la tabla siguiente aparecen representadas las órdenes de trabajo que pueden ser ejecutados en 5 puestos, del establecimiento: Pizzería Bellamar, perteneciente a la Empresa Municipal de Servicios Gastronómicos.

Se conoce además que el fondo de tiempo disponible de los puestos de trabajo es de: 30, 20, 25, 40 y 45 horas para los puestos del 1 al 5 respectivamente.

- Haga la asignación de las órdenes de trabajo a los diferentes puestos.
- ¿Cuál es el aprovechamiento total de los puestos de trabajo?
- ¿Cuál será el puesto de trabajo que tendrá mayor aprovechamiento?

4.- Un estudio realizado en un taller, arrojó que la mejor forma de asignar un grupo de trabajos indivisibles para garantizar un menor tiempo es la siguiente:

Órdenes de trabajo	Puesto de trabajo				
	1	2	3	4	5
A	8	10	3	20	15
B	12	4	14	15	6
C	10	26	24	28	12
D	-	-	4	-	-
E	20	25	22	15	24
F	50	15	6	40	20
G	15	30	18	16	14
H	-	6	-	8	-
I	10	35	25	12	9
J	6	4	20	8	15

MÁQUINAS	TRABAJOS
A	W-2, W-5
B	W-3
C	W-1, W-4

Compruebe dicha afirmación y tenga en cuenta los datos siguientes:

Trabajos	Máquinas		
	A	B	C
W-1	12	17	10
W-2	20	25	30
W-3	8	4	10
W-4	13	19	17
W-5	8	10	12
Capacidad (Minutos)	30	20	35

a. ¿Qué máquina alcanza un mayor aprovechamiento?

5.- Con el método de los índices, encuentre la asignación de los siguientes seis trabajos a cuatro máquinas, de manera que obtenga las horas mínimas de ejecución de los trabajos.

Trabajos	Máquinas			
	I	II	III	IV
1	40	50	60	70
2	100	40	80	30
3	50	60	20	100
4	110	80	100	120
5	120	60	70	80
6	30	30	80	50
Capacidad disponible	100 (horas)	80 (horas)	120 (horas)	40 (horas)

6.- Se considera una situación en la que tienen que terminarse siete trabajos, de A a G. La capacidad, en horas, necesaria

para cada trabajo en cada centro de maquinado intercambiable es la que sigue:

Trabajos	Centros de trabajo		
	1	2	3
A	25	35	70
B	50	60	40
C	300	200	450
D	180	160	120
E	60	90	150
F	90	45	60
G	75	220	250
Capacidad Disponible	140	235	250

Se desea realizar la asignación de los distintos trabajos a los diversos centros, de forma que se garanticen los menores tiempos de procesamiento, y que pueden ser asignadas tareas a los puestos de trabajo según lo permita su capacidad.

7.- En la empresa de Artesanía de Matanzas se realizan muñecas para la exportación. Las muñecas requieren de 6 pasos de trabajo como máximo para su confección. Los tiempos de elaboración de cada tipo de muñecas en cada paso de trabajo se exponen a continuación:

Trabajos	Puestos de trabajo			
	A	B	C	D
1	10	15	20	16
2	5	7	10	-
3	20	15	40	16
4	25	28	50	29
5	18	19	20	-
6	24	26	30	27

Se desea realizar la asignación de los distintos trabajos a los diversos puestos, de forma que se garanticen los menores tiempos de procesamiento, se conoce además que el fondo de

tiempo disponible de cada puesto de trabajo es de 60 horas y que pueden ser asignadas tareas a los puestos de trabajo según lo permita su capacidad.

8.- Un programador tiene cinco trabajos que pueden ser realizados en cualquiera de las cuatro máquinas, con los tiempos respectivos (en horas) que se muestran aquí. También se proporciona la capacidad disponible en cada centro de maquinado. Determine aquella asignación de los trabajos a las máquinas que darán por resultado horas mínimas de ejecución de los trabajos.

TRABAJO	Trabajo de máquina			
	1	2	3	4
A	50	60	80	70
B	100	120	110	70
C	100	80	130	60
D	80	70	40	30
E	75	100	70	120
Capacidad disponible	70	130	70	120

9. La Empresa Agropecuaria Militar Provincial Matanzas, cuenta con distintos tipos de trabajos, que se pueden realizar en 3 departamentos (A, B, C). Los mismos tienen 5, 4 y 6 puestos de trabajo respectivamente. A cada puesto se le puede asignar varias tareas.

- a) Realice la asignación de los trabajos a los diferentes departamentos.
- b) ¿En qué departamento se alcanza un mayor aprovechamiento del tiempo disponible?

Programación de la Producción

Trabajos	Puestos de trabajo														
	Dpto. A					Dpto. B					Dpto. C				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
A	12	15	10	20	16	8	14	6	18	9	19	17	4	11	22
B	15	18	19	10	20	16	5	7	40	25	28	24	30	14	29
C	10	11	15	12	14	4	6	7	16	18	22	20	25	19	13
D	22	4	12	17	19	9	18	6	14	8	16	15	10	25	9
E	10	15	20	16	5	7	40	25	28	18	14	24	26	30	35
F	-	-	-	-	25	-	-	14	-	-	-	10	-	-	-
G	20	25	18	24	14	26	19	28	15	7	5	16	29	27	30
H	10	13	8	18	14	6	12	4	16	7	17	15	2	9	20
Tiempo Disponible (Minutos)	40	55	60	50	40	35	30	20	35	50	45	50	60	50	45

2.6. Método Húngaro

El método Húngaro posee múltiples aplicaciones desde el punto de vista de la asignación, entre ellas se encuentran: la asignación de tareas a puestos de trabajos o máquinas, la ubicación espacial de máquinas y/o puestos de trabajo bajo la estructura de puestos de trabajo individuales y la ubicación de materiales en almacenes.

Según Hernández Pérez, G (1986): Dadas sus características, este método se utiliza cuando se adopta para el grupo de máquinas considerado una estructura espacial basada en el principio de organización individual de los puestos de trabajo (estructura individual). En correspondencia con esta estructura espacial, las máquinas poseen solo relación con los elementos limítrofes de otros sistemas parciales relacionados con éste. Entre las máquinas consideradas no existe acoplamiento funcional alguno (o al menos insignificante). De esta forma, la función objetivo que se debe minimizar corresponde al gasto de transporte total (T_{total}) del sistema, o sea:

$$(Q_{total}) = \sum_{i=1}^Z \sum_{j=1}^L Q_{ij} * X_{ij} \longrightarrow \text{mínimo}$$

Para las condiciones:

$$\sum_{i=1}^Z X_{ij} = 1 \quad (j = 1, 2, \dots, Z)$$

$$\sum_{j=1}^L X_{ij} = 1 \quad (i = 1, 2, \dots, L)$$

$$X_{ij} = \begin{cases} 0 \\ 1 \end{cases} \quad (i, j = 1, 2, \dots, Z, L)$$

Q_{ij} – gasto de transporte obtenido cuando la máquina i está ordenada en el lugar j , y está dado por el producto de ($l_{ik} * S_{kj}$), por ejemplo, en t .m/año.

X_{ij} - factor que refleja el estado de ordenamiento de una máquina i en un lugar j ($X_{ij}=1$, cuando la máquina i ocupa el lugar j y $X_{ij}=0$ en el caso contrario).

k - elementos u objetos externos al sistema considerado, con los cuales están relacionadas las máquinas u objetos que pertenecen a este.

El tratamiento aquí expuesto por Hernández Pérez, G. (1986), es válido para todo caso de asignación.

El punto de partida para aplicar el método, es una matriz del gasto de transporte del sistema parcial considerado (Q) que se obtiene al multiplicar la matriz de intensidad de transporte del sistema (I) con la matriz de las distancias (S) o sea:

$$Q = I * S$$

Una vez obtenida la matriz Q , la solución de ordenamiento se obtiene mediante la consecución de los pasos siguientes:

- Transformación sucesiva de la matriz de los gastos de transporte Q hasta el paso en que en cada fila y columna de la matriz transformada exista al menos un elemento nulo (cero).
- Selección en primer término de aquellos elementos nulos (0) en la matriz transformada que en cada fila y columna posibilitan un ordenamiento único.

La situación de los elementos nulos identifica la colocación de la máquina i (fila) en el lugar j (columna). Después se seleccionan aquellos elementos nulos en las filas o columnas donde existan más de uno de ellos, fijándose aquella posición, no coincidente con las anteriormente seleccionadas, pues a cada máquina o puesto de trabajo corresponde un solo lugar y

viceversa. Como resultado de este paso y en la iteración correspondiente, se obtiene la ubicación óptima de cada máquina o grupos de ellas.

A continuación se muestra un ejemplo que ilustra el método:

La fábrica Inpud productora de ollas de presión debido a la nueva tarea de la Revolución de asignar una olla de presión a cada núcleo familiar ha decidido acondicionar un nuevo taller para satisfacer la gran demanda de ollas de presión que presenta en estos momentos el país.

Debido a que, prácticamente, todas las piezas se elaboran totalmente en cada autómatas, no existen relaciones productivas entre, dichas máquinas. Sin, embargo, todas poseen relación con el almacén de materias primas (R), con un almacén intermedio previo al proceso de montaje de las válvulas (F) y con una instalación para el procesamiento de los desperdicios metálicos del maquinado (P), así como un taller de acabado (N) para algunas piezas. El total de máquinas fueron agrupadas según su tipo en tres grupos.

Los grupos de máquinas formados poseen aproximadamente la misma intensidad de transporte respecto a los k objetos o lugares externos al sistema considerado ($k=4$ para el ejemplo). Para ubicar los tres grupos de máquinas antes señaladas, se dispone de un edificio, en el cual se delimitan tres áreas (A_1 , A_2 y A_3), de 704, 680 y 680 m^2 , respectivamente, que satisfacen los requerimientos de espacio de cada grupo de equipos.

- a. Se desea determinar el ordenamiento óptimo de los grupos de máquinas en los lugares disponibles para ello, de forma tal que el gasto de transporte total del sistema sea mínimo.

sucesivas, de forma tal que en cada fila y columna de la matriz transformada de Q aparezca al menos un cero. Este proceso de transformación de la matriz Q se realiza de la siguiente manera:

1. Restar de la matriz Q el vector, columna formado por los menores valores de Q_{ij} de cada fila de Q con lo cual se obtiene la matriz transformada Q' , producto de la primera iteración.
2. Si de esta primera iteración no se obtiene el resultado deseado, entonces: se resta de la matriz transformada Q' , el vector fila formado por los menores valores de Q'_{ij} de cada columna de Q' , con lo cual se obtiene la matriz transformada Q'' , producto de la segunda iteración.

Al realizar estas transformaciones de Q se garantiza al menos que en cada fila y columna de Q'' exista un elemento nulo (cero) que, de hecho, constituye la base para identificar el ordenamiento de los objetos en los lugares disponibles. En ocasiones, estas dos primeras iteraciones son suficientes para obtener la solución óptima del ordenamiento de acuerdo con lo planteado en el segundo paso del método. Sin embargo, puede suceder también, que la posición de los elementos nulos (ceros) en la matriz transformada Q'' sea tal, que no permita definir claramente la solución óptima del ordenamiento.

En estos casos se precisa transformar la matriz Q'' hasta obtener una matriz transformada enésima de Q , en la cual pueda identificarse claramente la solución óptima del ordenamiento. Para ello pueden seguirse los pasos siguientes:

1. Seleccionar (\square) los elementos nulos (ceros) en aquellas filas de Q'' que poseen uno solo y tachar (X) los restan-

tes (si existieran) en la columna correspondiente al elemento nulo seleccionado.

2. Seleccionar () los elementos nulos (ceros) en aquellas columnas de Q'' que poseen uno solo y tachar (X) los restantes no tachados (si existieran) en la fila correspondiente al elemento nulo seleccionado.
3. Marcar () las filas que no tienen asignación, o sea, elementos nulos (ceros) seleccionados ()
4. Marcar () todas las columnas que tengan elementos nulos (cero), incluso tachado, en la fila marcada ()
5. Marcar () todas las filas que tengan asignaciones, o sea elementos nulos seleccionados () en las columnas marcadas.
6. Trazar una línea vertical por las columnas marcadas con () y una línea horizontal por las filas no marcadas.
7. Examinar todos los elementos de la matriz no cubiertos por las líneas anteriores y seleccionar el menor de ellos.
8. Restar este valor a los elementos no cubiertos por las líneas verticales y horizontales de la matriz Q'' y sumarlo a los elementos de dicha matriz comprendidos en las intersecciones de estas líneas verticales y horizontales para obtener así la matriz transformada Q''' .
9. Examinar la matriz Q''' y analizar si se cumple en esta la condición que asegura una solución óptima al problema de ordenamiento según lo planteado en el segundo paso del método. Si esto es posible, se determinan los gastos de transporte inherentes a la solución obtenida y si no, se repite el proceso a partir de Q''' hasta obtener una matriz transformada enésima de Q donde se satisfaga la condición óptima planteada.

Este procedimiento de transformaciones sucesivas hasta obtener la solución óptima a partir de la matriz inicial Q para el ejemplo en cuestión se muestra a continuación:

Como se puede observar de la matriz transformada Q''' , a cada grupo de máquinas Z_i corresponde aquel lugar A_j , identificado con el elemento nulo correspondiente, y donde se cumple lo planteado en el segundo paso del método.

2.6.1. Procedimiento del Método Húngaro.

i \ j	A ₁	A ₂	A ₃
Z ₁	109.1	128.6	150.4
Z ₂	123.4	150.8	214.4
Z ₃	204.0	244.2	322.4

109.1
123.4
204.0

=

0	19.5	41.3
0	27.4	91.0
0	40.2	118.4

= Q' (solución no óptima)

-

0	19.5	41.3
---	------	------

=

i \ j	A ₁	A ₂	A ₃
Z ₁	0	0	0
Z ₂	0	7.9	49.7
Z ₃	0	20.7	77.1

↔

0	0	0
0	7.9	49.7
0	20.7	77.1

= Q'' (solución no óptima)

↓

i \ j	A ₁	A ₂	A ₃
Z ₁	7.9	0	0
Z ₂	0	0	41.8
Z ₃	0	12.8	69.2

= Q''' (solución óptima)

El gasto de transporte inherente a la solución obtenida se determina en base a los valores de Q_{ij} correspondientes en la matriz inicial, o sea:

A_1	A_2	A_3
Z_3	Z_2	Z_1
204,0	150,8	150,4
Q total = 505.2 t/máq/día		

Por ser esta la solución óptima al problema planteado, se cumple que:

$$Q_{\text{total}} = Q_{\text{min}} = 505,2 \text{ (t. m/día)}$$

2.6.2. Preguntas de autocontrol de asignación

1. ¿Cuál es el objetivo que persigue la asignación como función dentro de la Programación de la Producción?
2. Mencione los métodos de la asignación.
3. Diga las condiciones que exige cada método para la aplicación de la asignación.

2.6.3. Ejercicio resuelto # uno, para la comprensión del método Húngaro.

En la fábrica Input donde se fabrican las cafeteras, se decide crear un taller donde se situarán 4 máquinas (A, B, C y D) automáticas individuales para la producción de las piezas que conforman las cafeteras. Entre estas máquinas no existen relaciones productivas.

Para ubicar las cuatro máquinas antes señaladas, se dispone de un edificio, en el cual existen cuatro áreas (A_1 , A_2 , A_3 y A_4) que satisfacen los requerimientos de espacio de cada equipo. Se desea ubicar las máquinas de forma tal que garantice un

gasto de transporte total mínimo entre las máquinas y el exterior del taller. Se conoce la matriz de gasto de transporte, por lo tanto haga la asignación que cumpla con las expectativas planteadas y calcule el gasto de transporte según la asignación obtenida.

Tabla 2.52. Matriz del gasto de transporte.

	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄
A	152	130	126	84
B	32	58	80	72
C	110	125	95	110
D	26	74	85	52

<table border="1" style="border-collapse: collapse; text-align: center;"> <thead> <tr> <th style="width: 20px;"></th> <th style="width: 40px;">A₁</th> <th style="width: 40px;">A₂</th> <th style="width: 40px;">A₃</th> <th style="width: 40px;">A₄</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <th style="width: 20px;">A</th> <td>152</td> <td>130</td> <td>126</td> <td>84</td> </tr> <tr> <th style="width: 20px;">B</th> <td>32</td> <td>58</td> <td>80</td> <td>72</td> </tr> <tr> <th style="width: 20px;">C</th> <td>110</td> <td>125</td> <td>95</td> <td>110</td> </tr> <tr> <th style="width: 20px;">D</th> <td>26</td> <td>74</td> <td>85</td> <td>52</td> </tr> </tbody> </table>		A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A	152	130	126	84	B	32	58	80	72	C	110	125	95	110	D	26	74	85	52	-	<table border="1" style="border-collapse: collapse; text-align: center;"> <tbody> <tr><td>84</td></tr> <tr><td>32</td></tr> <tr><td>95</td></tr> <tr><td>26</td></tr> </tbody> </table>	84	32	95	26	=	<table border="1" style="border-collapse: collapse; text-align: center;"> <tbody> <tr><td>68</td><td>46</td><td>42</td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>26</td><td>48</td><td>40</td></tr> <tr><td>15</td><td>30</td><td>0</td><td>15</td></tr> <tr><td>0</td><td>48</td><td>59</td><td>26</td></tr> </tbody> </table>	68	46	42	0	0	26	48	40	15	30	0	15	0	48	59	26	<p>Q' (solución no óptima)</p>
	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄																																														
A	152	130	126	84																																														
B	32	58	80	72																																														
C	110	125	95	110																																														
D	26	74	85	52																																														
84																																																		
32																																																		
95																																																		
26																																																		
68	46	42	0																																															
0	26	48	40																																															
15	30	0	15																																															
0	48	59	26																																															
-																																																		
=																																																		
<table border="1" style="border-collapse: collapse; text-align: center; margin: auto;"> <tbody> <tr><td>68</td><td>20</td><td>42</td><td style="border: 2px solid black;">0</td></tr> <tr><td style="border: 2px solid black; text-align: left;">0</td><td style="border: 2px solid black;">0</td><td>48</td><td>40</td></tr> <tr><td>15</td><td>4</td><td style="border: 2px solid black;">0</td><td>15</td></tr> <tr><td style="border: 2px solid black;">0</td><td>22</td><td>59</td><td>26</td></tr> </tbody> </table>					68	20	42	0	0	0	48	40	15	4	0	15	0	22	59	26	<p>Q' (solución óptima)</p>																													
68	20	42	0																																															
0	0	48	40																																															
15	4	0	15																																															
0	22	59	26																																															

Asignaciones realizadas.

A ₁	A ₂	A ₃	A ₄
D	B	C	A
26	58	95	84
Gasto total de transporte Q _{min} = 263 t/máq/mes			

2.6.4. Ejercicio resuelto # dos.

Según Chase & Aquilano et al. (2000): El método de asignación representa un caso especial del método de transporte de la programación lineal. Se puede aplicar a situaciones donde hay n fuentes de suministro y n usos de la demanda (por ejemplo, cinco tareas en cinco máquinas) y el objeto es reducir al mínimo o aumentar al máximo algunas medidas de la eficacia.

Esta técnica es fácil de aplicar cuando se trata de asignar tareas a centros de trabajo, personas a tareas y demás. El método de las asignaciones es adecuado para resolver problemas que tienen las siguientes características:

1. Tenemos n "cosas" para distribuir las entre n "destinos".
2. Cada cosa debe ser asignada a un único destino.
3. Sólo podemos usar un criterio (por ejemplo, costo mínimo, utilidad máxima o tiempo mínimo para terminar).

Se supone que un programador tiene cinco trabajos que pueden ser realizados en cualquiera de las cinco máquinas ($n = 5$). En la tabla 2.53 se muestra el costo por terminar cada combinación de tarea-máquina. El programador quiere

encontrar la asignación que represente el costo mínimo. (Existen 5 ó 120 asignaciones posibles).

Tabla 2.53. Matriz de asignaciones que muestra los costos de procesamiento de cada trabajo en la máquina.

Tarea	Máquina				
	A	B	C	D	E
I	\$5	\$6	\$4	\$8	\$3
II	6	4	9	8	5
III	4	3	2	5	4
IV	7	2	4	5	3
V	3	6	4	5	5

Solución:

Se puede resolver este problema si se aplica el método de las asignaciones, que consta de cuatro pasos:

1. En cada fila, tomar la cifra más baja y restarla de sí misma y de todas las demás cifras de la fila. (Entonces habrá, cuando menos, un cero en cada fila).
2. En cada columna, tomar la cifra más baja y restarla de todas las demás cifras de la columna. (Entonces habrá, cuando menos, un cero en cada columna).
3. Establecer si la cantidad mínima de líneas requeridas para cubrir cada cero es igual a n . En tal caso, se habrá encontrado una solución óptima, porque las asignaciones de trabajos a las máquinas se harán con

cero entradas y esta prueba demuestra que es posible. Si la cantidad mínima de líneas requeridas es inferior a n , entonces se tendrá que pasar al paso 4.

4. Sacar la cantidad mínima posible de líneas a lo largo de todos los ceros. (Podrían ser las mismas líneas usadas en el paso 3). Tomar la cifra más baja que no esté cubierta por las líneas y restarla de sí misma y de todas las cifras no cubiertas, y sumarla a la cifra en cada intersección de líneas. Repetir el paso 3.

En el caso del problema del ejemplo, se seguirían los pasos enumerados.

Paso 1. Reducir filas: se resta la cifra más baja de cada fila.

Tarea	Máquina				
	A	B	C	D	E
I	2	3	1	5	0
II	2	0	5	4	1
III	2	1	0	3	2
IV	5	0	2	3	1
V	0	3	1	2	2

Paso 2. Reducir columnas: se resta la cifra más baja de cada columna.

Tarea	Máquina				
	A	B	C	D	E
I	2	3	1	3	0
II	2	0	5	2	1
III	2	1	0	1	2
IV	5	0	2	1	1
V	0	3	1	0	2

Paso 3. Aplicar la prueba de la línea: el número de líneas para cubrir todos los ceros es 4, porque se requieren 5; pasar al paso 4.

Tarea	Máquina				
	A	B	C	D	E
I	2	3	1	3	0
II	2	0	5	2	1
III	2	1	0	1	2
IV	5	0	2	1	1
V	0	3	1	0	2

Paso 4. Restar la cifra más baja no cubierta y sumar a la intersección de las líneas. Con las líneas trazadas en el paso 3, la cifra más baja no cubierta es 1.

Tarea	Máquina				
	A	B	C	D	E
I	1	3	0	2	0
II	1	0	4	1	1
III	2	2	0	1	3
IV	4	0	1	0	1
V	0	4	1	0	1

Solución óptima, según la “prueba de líneas”.

Tarea	Máquina				
	A	B	C	D	E
I	1	3	0	2	0
II	1	0	4	1	1
III	2	2	0	1	3
IV	4	0	1	0	1
V	0	4	1	0	3

Asignaciones óptimas y sus costos.

Trabajo I a la máquina E	\$ 3
Trabajo II a la máquina B	4
Trabajo III a la máquina C	2
Trabajo IV a la máquina D	5
Trabajo V a la máquina A	3
Costo total	\$ 17

Si hay dos ceros en tres filas y tres columnas, la solución que aparece es la única posible para este problema, porque el trabajo, III debe ser asignado a la máquina C para cumplir con el requerimiento de “asignar a cero”. Otros problemas podrían tener más de una solución óptima, y depende, naturalmente, de los costos involucrados.

La lógica extra matemática del método de asignaciones es reducir al mínimo los costos de oportunidad⁵. Por ejemplo, si se decidiera asignar el trabajo I a la máquina A en lugar de a la máquina E, se estaría sacrificando la oportunidad de ahorrar \$ 2 ($\$ 5 - \$ 3$). El algoritmo de asignación realiza estas comparaciones para el conjunto entero de asignaciones alternativas por medio de la reducción de filas y columnas, como se describe en los pasos 1 y 2. Hace comparaciones similares en el paso 4. Evidentemente, si las asignaciones son hechas a las celdas cero no ocurre costo de oportunidad alguno respecto a la matriz entera.

2.7. Problemas propuestos

1. Un programador del hospital Mary Mont necesita asignar cuatro técnicos a cuatro diferentes trabajos. Las estimaciones del tiempo que se requiere para terminar cada trabajo fueron proporcionadas por cada técnico y se resume como sigue:

⁵ La lógica que fundamenta el procedimiento de sumar y restar los valores más bajos de las celdas es la siguiente: Se anotan más ceros en la matriz restando una cantidad igual a una de las celdas de todas las celdas. Las cifras negativas, que no son permitidas, se presentan en la matriz. Para deshacerse de las cifras negativas, se deben tomar una cantidad igual al número negativo máximo y sumarla a cada elemento de la fila o la columna donde se presente. Esto resulta en que se suma esta cantidad dos veces en cualquier celda que se encuentre en la intersección de una fila y una columna que fueron cambiadas. El resultado neto es que las filas y las columnas alineadas se revierten a sus cantidades originales y las intersecciones aumentan en cantidad igual a la que se resta de las celdas no cubiertas. (Para comprobar esto, se puede resolver el ejemplo sin usar líneas.)

Técnico	Horas para completar el trabajo			
	1	2	3	4
A	20	36	31	17
B	24	34	45	12
C	22	45	38	18
D	37	40	35	18

a) Con el método de asignación de programación lineal, ¿cómo asignaría usted los trabajos a los técnicos para minimizar el tiempo total de trabajo?

2.- Suponga que en el problema 1, no es deseable asignar el técnico A al trabajo 1, ni el técnico D al trabajo 3. ¿Cómo afecta esto los resultados?

3.- Un administrador de Paul's Laboratorios debe asignar tres ingenieros a tres tareas diferentes. A partir de datos históricos se han determinado las estimaciones de tiempo necesario para completar cada tarea por cada ingeniero, y se resumen como sigue:

Ingeniero	Horas para completar el trabajo		
	1	2	3
A	10	12	16
B	12	24	20
C	14	20	24

a) Con el método de asignación de programación lineal, ¿cómo asignaría usted los trabajos a los ingenieros a fin de minimizar el tiempo total de trabajo?

4.- El programador de CPA Company necesita asignar cuatro contadores a cuatro diferentes proyectos. El programador determinó las estimaciones de tiempo para completar cada trabajo, y éstas se resumen a continuación.

Contador	Horas para completar el trabajo			
	1	2	3	4
A	16	29	34	19
B	11	43	32	23
C	17	36	43	21
D	17	33	40	36

a) Con el método de asignación de programación lineal, ¿cómo asignaría usted proyectos para minimizar el tiempo total de trabajo?

5.- Para el problema 4, suponga que no es deseable asignar al contador A, el trabajo 4 ni al contador D, el trabajo 2. ¿Afectará esto sus resultados? Si es así, ¿cómo? (Sugerencia: Bloquee los cuadros no deseados o asígneles costos muy altos y vuelva a calcular el problema.)

6.- Un programador tiene cuatro trabajos que pueden realizarse en cualquiera de cinco máquinas, con sus respectivos tiempos (en horas) como se muestra aquí. Determine aquella asignación de trabajos a las máquinas que resulte en horas mínimas.

Máquinas	Trabajos			
	1	2	3	4
A	60	110	70	50
B	70	40	100	80
C	70	80	100	120
D	100	70	80	110
E	30	120	60	70

(Sugerencia: Agregue una columna falsa con valores de cero para el trabajo 5 y repita el procedimiento acostumbrado. A una de las máquinas se le asignará un trabajo falso en la solución final; es decir, la máquina estará parada.)

7.- La siguiente matriz muestra los costos, para asignar a los individuos A, B, C, y D las tareas 1, 2, 3 y 4. Resuelve el problema y muestre las asignaciones finales a efecto de reducir los costos al mínimo.

Individuos	Tareas			
	1	2	3	4
A	7	9	3	5
B	3	11	7	6
C	4	5	6	2
D	5	9	10	12

8.- En el taller de una planta, seis operadores están singularmente calificados para operar cualquiera de las cinco máquinas del taller. Éste tenía una cantidad considerable de pedidos atrasados acumulados y las cinco máquinas estaban ocupadas todo el tiempo. El operario que no estaba operando una máquina, normalmente estaba ocupado haciendo trabajo de oficina o de mantenimiento rutinario. Dados los valores del programa siguiente, para cada operario en cada una de las cinco máquinas, elabore la asignación óptima.

(Sugerencia: Añada una columna auxiliar con costos por valor de cero y resuelva usando el método de las asignaciones.)

Operario	Máquina				
	1	2	3	4	5
A	65	50	60	55	80
B	30	75	125	50	40
C	75	35	85	95	45
D	60	40	115	130	110
E	90	85	40	80	95
F	145	60	55	45	85

9.- La siguiente matriz contiene los costos (en dólares) ligados a asignar los trabajos A, B, C, D y E a las máquinas 1, 2, 3, 4 y 5. Asigne los trabajos a las máquinas de modo que disminuya al mínimo los costos.

Tareas	Máquinas				
	1	2	3	4	5
A	6	11	12	3	10
B	5	12	10	7	9
C	7	14	13	8	12
D	4	15	16	7	9
E	5	13	17	11	12

TEMA 3.

La secuenciación como función dentro de la Programación de la Producción

Tema 3. La secuenciación como función dentro de la Programación de la Producción

3.1. Secuencia de las tareas.

El proceso para establecer cuál tarea se realizará primero en una máquina o en un centro de trabajo cualquiera se conoce como establecer la secuencia o el orden de prioridad. Las prioridades son las que usamos para determinar la secuencia de las tareas. Pueden ser muy sencillas y requerir tan sólo que las tareas sigan una secuencia de acuerdo con un dato, como sería el tiempo de procesamiento, la fecha de vencimiento o el orden de su llegada.

3.2. Sistemas de prioridades.

Se desean muchas características positivas en un buen sistema de prioridades. El sistema debe ser relativo y especificar el orden en que se deben procesar los trabajos: primero, segundo, tercero, etcétera. Un sistema de prioridades, en caso de ser necesario. Esto es especialmente cierto para productos con largo tiempo de entrega y cuya demanda es incierta. Por último, un sistema de prioridades debe reflejar verdaderamente las fechas de entrega comprometida.

3.3. Reglas de prioridad para el despacho de los trabajos.

Según Narasimhan (1996): Se usan reglas de prioridad para preparar listas de despacho de trabajos o lotes en talleres que laboran a base de órdenes de trabajo. Proporcionan directrices simplificadas para la secuencia en que se deben elaborar los trabajos cuando esté disponible la instalación o el centro de maquinado. Se han desarrollado numerosas reglas, algunas son estáticas y otras dinámicas. Las reglas son especialmente

aplicables para procesos intermitentes y de lotes, con exigencias independientes. Las reglas de prioridad tratan de minimizar el tiempo medio de flujo, el tiempo medio de terminación y el tiempo medio de espera, y de maximizar el volumen total de la producción, etcétera. Se han realizado varios experimentos de simulación para comparar el desempeño de las reglas de prioridad.

Las reglas heurísticas permiten obtener de una manera fácil y rápida soluciones que evidentemente no son óptimas, pero que en base a la búsqueda (mediante simulación posiblemente) las más apropiadas a la estructura y necesidades del taller concreto pueden ser bastante aceptables.

Se presenta una lista con las reglas heurísticas más usadas para fijar el orden de los trabajos, así como la nomenclatura a que se hará referencia:

Ready (ri): Representa el instante en que el trabajo ha llegado al taller para ser procesado.

Demora (Li): Es la desviación entre el tiempo real de ejecución de una tarea y su fecha de cumplimiento. Una tarea tendrá demora positiva si se termina con posterioridad a su fecha de cumplimiento y la tendrá negativa si se finaliza antes.

Tardanza (Ti): Es el nombre con que se conoce a la demora positiva. La tardanza es 0 cuando la demora es 0 o negativa.

Holgura (Sli): Es el tiempo sobrante que se obtiene como diferencia entre la fecha de entrega y el tiempo de procesamiento del artículo.

Staticlack (Si): La holgura estática se define como el tiempo disponible menos el de proceso, o sea; $S_i = [(d_i - r_i) - T_{P_i}]$.

Tiempo de flujo (Fi): Es el plazo de tiempo que va desde que una tarea está disponible para su ejecución hasta el momento

en que se ha finalizado, por tanto es la suma del tiempo de espera y del tiempo de procesamiento.

Total processing (T_{Pi}): Es la suma de todos los tiempos de proceso que tiene que sufrir J_i en el taller, o sea, $T_{Pi} = t_{ij}$.

Tiempo de procesamiento (t_i): Es la estimación del tiempo necesario para realizar una tarea, en la cual se incluye el tiempo de preparación.

Fecha de cumplimiento (d_i): Es el momento establecido para que una tarea haya sido realizada. Su finalización más allá de este momento nos llevará a considerar la tarea como retrasada, con sus correspondientes costos y consecuencias.

Tiempo de terminación (C_i): Es el tiempo que transcurre desde que comienza el trabajo en la primera tarea y el tiempo en que se termina la tarea i .

Se han realizado diferentes pruebas para comprobar el comportamiento de las anteriores reglas ante diferentes entornos. Los resultados que se obtienen de estas investigaciones son muchas veces contradictorios, debido fundamentalmente a que sus eficiencias son muy dependientes de la estructura productiva que se estudie.

A continuación se muestra en la tabla 3.1 las reglas estáticas según diferentes autores.

Tabla 3.1. Reglas estáticas.

Autores	Año	Regla	Simbología	Descripción
Narasihman	1996	Fecha de entrega más próxima.	EDD ⁶ (<u>Earliest DueDate</u>).	Da secuencia a los trabajos de acuerdo con su fecha de entrega más próxima y se procese en ese orden.
		Tiempo de procesamiento más corto o Tiempo más corto de operación.	SPT (<u>Shortestprocessingtime</u>).	Selecciona primero el trabajo con el tiempo de operación más corto y los trabajos se procesan en ese orden.
		Tiempo de procesamiento más largo.	LPT (<u>Longestprocessingtime</u>).	Selecciona el trabajo con el tiempo de operación más largo en la máquina.
		Tiempo de procesamiento más corto interrumpido.	TSPT	Da secuencia a los trabajos con el tiempo de proceso más corto. Los trabajos que esperan más allá de su tiempo de entrega se procesan primero. Esos trabajos pasan a ser los últimos en ser procesados (FCFS).
		Menor holgura	LS	Selecciona en primer lugar el trabajo con la menor holgura. Se define como el número de días que faltan para la entrega.

⁶ Nombrada MINDD por Schroeder, R. (1992).

				fecha de entrega menor
		Costo sobre tiempo.	COVERT	Calcula la relación del costo sobre el tiempo (T) de procesamiento con la relación más grande.
Chase, et al.	2007	Tiempo más breve de operación.	SOT (por sus siglas en inglés), (<u>Shortest operation time</u>).	Primero procesar la operación que queda por quedar terminada, de menor tiempo y así sucesivamente. Se relaciona con la regla SPT.
		Fecha de vencimiento, primera fecha de vencimiento, primero.	DDATE (por sus siglas en inglés).	Procesar el trabajo, según la fecha de vencimiento.
		Margen de tiempo restante.	STR (por sus siglas en inglés).	Los pedidos que tienen un margen de tiempo son procesados primero. $SRT = \text{Tiempo restante} / \text{tiempo restante para ser procesado}$
		Margen de tiempo restante de operación.	SRT/OP (por sus siglas en inglés).	Los pedidos que tienen un margen de tiempo son procesados primero. $SRT/OP = SRT / \text{Número de operaciones}$
		Proporción crítica.	CR ⁷ (por sus siglas en inglés).	Esta se calcula como $CR = \text{Fecha de vencimiento} / \text{Fecha de inicio de jornadas laborales}$

⁷Nombrada CR por Schroeder, R. (1992).

				proporción crítica más CR < 1 Retrasado. CR = 1 En tiempo. CR > 1 Adelantado.
		Último en llegar, primero en salir.	LCFS (por sus siglas en inglés).	A medida que entran del montón; el opera pedido que está arriba
		Orden aleatorio o capricho. ⁸	—	Los supervisores o los trabajo que quieren pa en la práctica, se trat con otras reglas.
Adenso Díaz.	1993	<u>Firstatshop, first out).</u>	FASFO	Se selecciona los trab taller, o sea, tendrán m ri
		<u>Shorteststaticlack.</u>	SSLACK	Se ordenan los trabaj holgura estática si
Fundora Miranda, A.	1987	Primera operación- primera más corta.	—	Se programan los trab en la primera operaci comience tan pronto co
		Primera operación-	—	Se programa primero

⁸Nombrada RANDOM por Schroeder, R. (1992).

		primera más larga.		tiempo de procesamien
		Última operación- última más corta.	—	La selección estará c operación, se program operación más corta.
		Primera aquella que tenga menor duración del ciclo tecnológico.	—	Se suman las operaci programar, y en el pre total de procesamiento
		Primera aquella con el tiempo total de procesamiento mayor.	—	Consiste en programar procesamiento mayor.
		Primera aquella operación que posea el menor tiempo de holgura.	—	Calcula la holgura de c da la máxima priorid mínima.
		Primero aquella con menor razón de holgura.	—	Se programa aquel qu tiempo necesario para para su fecha de entre
Krajewski & Ritzman.	2008	Holgura por operaciones.	SR/O	Esta regla se calcula: (v - Tiempo total restant restantes. (Se incluye la operació
		Índice de prioridad u órdenes de clientes	OCP	Serán procesados a atribuido al cliente o al

		preferentes.		
		Índice de holgura.	—	Esta regla se calcula el tiempo de procesamiento restante (Minimiza la holgura).
		Índice de falla.	—	Ésta se calcula: Cantidad de trabajo pendiente / tiempo de procesamiento promedio.
Schroeder	1992	Tiempo de procesamiento mínimo.	MINPRT (<u>Minimum processingtime</u>).	Se programa primero aquellos trabajos con menor tiempo de procesamiento. Maximiza la utilización de recursos; minimiza el tiempo medio de procesamiento; minimiza el número medio de trabajos en proceso (inventario).
		MINPRT Truncado	MINPRT	En esta regla el tiempo de procesamiento más corto se ejecuta primero, al igual que en el caso de los trabajos con prioridad. En algunos casos en que un trabajo tiene una prioridad específica. Entonces se ejecuta primero la tarea que ha estado esperando el mayor tiempo. El resultado de esta acción es que los trabajos más largos de manejan con mayor eficiencia. Con esto se logra un menor tiempo de procesamiento MINPRT, que implica una mayor eficiencia.

				cola y no se procesan.
		Programación compensada (variante de la regla SPT).	WSPT (<u>Weighted-schedulingrule</u>).	Se asigna a cada tarea de forma que cuanto más tarde se procese, mayor sea su importancia (w_i), para $t(1) < t(2) < \dots < t(n)$ $w(1) \quad w(2) \quad w(n)$
		Tiempo desperdiciado mínimo de operación.	MINSOP (<u>Minimumslacktime per operation</u>).	“El tiempo desperdiciado para la fecha de procesamiento; es decir, el tiempo desperdiciado de cero a la fecha de terminarse antes de las colas. En esta regla, el tiempo de espera entre el número de tareas y el tiempo de procesamiento.”
		Los que llegan primero se atienden primero.	FCFS (<u>Firstcome, firstserved</u>).	Esta regla se basa en el tiempo de llegada al cual la tarea que llega primero se procesa primero.
		Fecha de inicio planeada mínima.	MINSD (<u>Minimum plannedstartdate</u>).	En esta regla se utiliza la fecha de inicio anterior para determinar la fecha de inicio de cada tarea. Se procesa la tarea con la fecha de inicio más cercana.

Las heurísticas marcadas con asterisco precisan del conocimiento de las fechas de entrega d_i , por lo que sólo podrían ser aplicadas en aquellos entornos en los que estas fechas tengan sentido. Asimismo, junto con su descripción se indica el nombre con el que suele aparecer en la literatura anglosajona.

Tabla 3.2. Reglas dinámicas. Según Díaz A. (1993).

Reglas	Criterios
SIO (<u>shortest imminent operation</u>)	Se selecciona como siguiente trabajo aquel de entre los que puedan procesarse en ese momento, que tenga MENOR $t_i, j(t)$
LIO (<u>longest imminent operation</u>)	Se selecciona como siguiente trabajo aquel de MAYOR $t_i, j(t)$
SRPT (<u>shortest remaining processing time</u>)	Se selecciona como siguiente trabajo aquel con MENOR tiempo de proceso restante $RP_i(t)$
LRPT (<u>longest remaining processing time</u>)	Se selecciona como siguiente trabajo aquel con MAYOR tiempo de proceso restante $RP_i(t)$
SIO/TP	Se selecciona como siguiente trabajo aquel con MENOR cociente entre tiempo de la siguiente operación y el tiempo total de proceso: $t_i, j(t) / TP_j$
SIO . TP	Se selecciona como siguiente trabajo aquel con MENOR producto entre tiempo de la siguiente operación y el tiempo total de proceso: $t_i, j(t) \cdot TP_j$
LIO/TP	Se selecciona como siguiente trabajo aquel con MAYOR cociente entre tiempo de la siguiente operación y el tiempo total de proceso: $t_i, j(t) / TP_j$
LIO . TP	Se selecciona como siguiente trabajo aquel con MAYOR producto entre tiempo de la siguiente operación y el tiempo total

	de proceso: $t_i, j(t)$. TP j
FRO (<u>fewest remaining operation</u>)	Se selecciona como siguiente trabajo aquel con MENOR número de operaciones restantes card. $[RO_i(t)]$
MRO (<u>maximum remaining operation</u>)	Se selecciona como siguiente trabajo aquel con MAYOR número de operaciones restantes card $[RO_i(t)]$
FIFO(<u>first in, first out</u>)	Se selecciona como siguiente trabajo aquel que lleva más tiempo preparado para realizar su siguiente operación.
SLACK (<u>shortest lack</u>)	*Se selecciona como siguiente trabajo aquel con MENOR "holgura dinámica" $S_i(t)$
SLACK/RO	*Se selecciona como siguiente trabajo aquel con MENOR "holgura dinámica" por operación restante, o sea, aquel con menor $S_i(t)/RO_i(t)$
SSLACK/RO	*Se selecciona como siguiente trabajo aquel con MENOR cociente entre la "holgura estática" S_j por operación restante, o sea, aquel con menor $S_i/RO_i(t)$
SLACK/TP	*Se selecciona como siguiente trabajo aquel con MENOR cociente entre la "holgura dinámica" $S_j(t)$ y el tiempo total del proceso, o sea, aquel con menor $S_i(t)/TP_i$
SLACK/RP	*Se selecciona como siguiente trabajo aquel con MENOR cociente entre la "holgura dinámica" $S_j(t)$ y el tiempo de proceso restante, o sea, aquel con menor $S_i(t)/RP_i$

3.4. Comparación de las reglas de prioridad.

Según Chase et al. (2007), se resumen algunos de los resultados de las reglas anteriormente estudiadas:

REGLA	TIEMPO TOTAL	MEDIA DE TIEMPO	DEMORA PROMEDIO
	PARA TERMINAR (DÍAS)	PARA TERMINAR (DIAS)	PARA TERMINAR (DIAS)
FCFS	50	10	4,6
SOT	36	7,2	2,4
DDATE	39	7,8	2,4
LCFS	46	9,2	4.0
ALEATORIO	53	10,6	5,4
STR	43	8,6	3,2

Evidentemente, en este caso la regla del SOT es mejor que las otras, ¿pero siempre es así? La respuesta es sí. Es más, se puede demostrar matemáticamente, que la regla del SOT produce una solución óptima para el caso $n/1$, con otros criterios de evaluación como la media del tiempo de espera y la media del tiempo para terminar. De hecho, esta simple regla es tan potente que ha sido llamada " el concepto más importante para el tema de secuenciado"⁹.

Según Schroeder, R. (1992), en un estudio clásico de las reglas de despacho que realizó EarlLeGrande se evaluaron 6 reglas en la Hughes Aircraft en El Segundo, California. El taller

⁹R. W. Conway, W. L. Maxwell y L. W. Miller, Theory of Scheduling, Addison - Wesley, Reading, MA, 1967, página 26. Libro clásico sobre el tema.

de fabricación de Hughes tenía mil máquinas, entre cuatrocientos y quinientos trabajadores y entre 1800 y 2500 pedidos en proceso; terminaba entre 100 y 150 órdenes de taller al día. El rendimiento de las reglas se evaluó simulando el taller en detalle. Cada vez que se terminaba una tarea en una máquina, se utilizaba la regla de despacho para seleccionar la siguiente.

En la tabla siguiente se muestra el resumen de algunas de las reglas anteriormente estudiadas según Schroeder, R. (1992).

Criterio*	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Rango relativo Total
Peso específico	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
MINPRT	1,00	0,83	1,00	0,20	1,00	1,00	0,76	0,91	1,00	1,00	8,70
MINSOP	0,87	1,00	0,63	1,00	0,73	0,52	0,96	0,99	0,92	0,92	8,54
FCFS	0,80	0,54	0,54	0,20	0,73	0,38	0,84	0,98	0,93	0,93	6,93
MINSO	0,84	0,48	0,46	0,22	0,68	0,36	0,91	1,00	0,91	0,91	6,77
MINDD	0,94	0,62	0,64	0,24	0,84	0,51	1,00	0,99	0,87	0,87	7,52
RANDOM	0,84	0,68	0,79	0,20	0,67	0,66	0,80	0,93	0,92	0,91	7,40

*Significado de los criterios.

1. Números de pedidos terminados.
2. Porcentaje de pedidos terminados tarde.
3. Promedio de la distribución de terminaciones.
4. Desviación estándar de la distribución de terminaciones.
5. Número promedio de pedidos que esperan en el taller.
6. Tiempo de espera promedio de los pedidos.
7. Costo anual de mantener los pedidos en una cola.

8. Relación de costos de inventarios en espera con el costo de mantener inventarios en la máquina.
9. Porcentaje de mano de obra utilizada.
10. Porcentaje de la capacidad de máquinas utilizado.

Para poder evaluar estas reglas es necesario desarrollar criterios para el rendimiento del taller. Como ya se mencionó, existen tres tipos de criterios: eficiencia de las máquinas y de la mano de obra, inventario de producto en proceso y servicio a clientes. Aunque se trata sólo de tres criterios, existen muchas formas de medirlos.

En la simulación de la Hughes Aircraft, se seleccionaron 10 unidades de medida como se muestra en la tabla anterior. También indica el desempeño de cada regla sobre cada unidad de medida. En esta tabla un valor de 1.00 indica el mejor rendimiento en cada unidad de medida mientras que los demás valores son medidas relativas. La tabla indica que la regla MINPRT tiene su mejor desempeño en la medición de eficiencia y velocidad de flujo mientras que la regla MINSOP es mejor para cumplir con las fechas de entrega.

Este resultado era de esperarse debido a que la regla MINSOP incorpora la fecha de entrega en su concepto mientras que MINPRT no la hace. También debe notarse que la regla FCFS, que es muy popular en la práctica, tiene un mal desempeño en todos los criterios. De hecho, la FCFS es peor que la regla RANDOM (aleatoria).

3.5. Programar n trabajos en una máquina.

Se analizan algunas reglas de prioridad comparándolas en una situación de programación estática que involucra cuatro trabajos en una sola máquina. (En terminología de

programación, este tipo de problemas se conoce como "problema de n trabajos y una sola máquina" o simplemente "n/1".) La dificultad teórica de los problemas de programación aumenta a medida que se considere más máquinas, y no más trabajos que se deben procesar. Por lo tanto, la única restricción para n es que tiene que ser un número finito, especificado.

3.5.1. Ejemplo 1.

Mike Morales es supervisor de la Legal Copy-Express, que brinda servicios de copiado a bufetes de abogados en el centro de Los Ángeles. Cinco clientes presentaron sus pedidos al inicio de la semana. Los datos específicos para la programación son:

TAREA POR ORDEN DE LLEGADA	TIEMPO DE PROCESAMIENTO (DIAS)	FECHA DE VENCIMIENTO (DIAS A PARTIR DE HOY)
A	3	5
B	4	6
C	2	7
D	6	9
E	1	2

Todos los pedidos requieren que Morales use la única máquina que tiene de copias a color. Así, debe decidir la secuencia del procesamiento de los cinco pedidos. El criterio para evaluarlos es el tiempo mínimo de flujo. Supongamos que Morales decide aplicar la regla primero en llegar primero en salir (FCFS) porque quiere que los clientes piensen que la Legal Copy-Express es un negocio justo.

Solución:

REGLA FCFS: La regla FCFS produce los siguientes tiempos de flujo:

PROGRAMA FCFS

SECUENCIA DE TAREAS	TIEMPO DE PROCESAMIENTO	FECHA DE VENCIMIENTO	TIEMPO DE FLUJO
	(DÍAS)	(DÍAS A PARTIR DE HOY)	(DÍAS)
A	3	5	$0 + 3 = 3$
B	4	6	$3 + 4 = 7$
C	2	7	$7 + 2 = 9$
D	6	9	$9 + 6 = 15$
E	1	2	$15 + 1 = 16$
Total de tiempo del flujo = $3+7+9+15+16 = 50$ días			
Media del tiempo del flujo = $50 : 5 = 10$ días			

Si se compara la fecha de vencimiento de cada trabajo con el tiempo de su flujo, se notará que sólo el trabajo A terminará a tiempo. Los trabajos B, C, D y E estarán atrasados 1, 2, 6 y 14 días, respectivamente. En promedio, un trabajo estará atrasado $(0+1+2+6+14)/5 = 4.6$ días.

Solución:

Regla SOT: Se analizará la regla más breve de operación. En este caso, Morales concede prioridad al pedido que toma menos tiempo para su procesamiento. Los tiempos resultantes del flujo son:

PROGRAMA SOT

SECUENCIA DE TAREAS	TIEMPO DE PROCESAMIENTO	FECHA DE VENCIMIENTO	TIEMPO DE FLUJO
	(DÍAS)	(DÍAS A PARTIR DE HOY)	(DÍAS)
E	1	2	$0 + 1 = 1$
C	2	7	$1 + 2 = 3$

A	3	5	$3 + 3 = 6$
B	4	6	$6 + 4 = 10$
D	6	9	$10 + 6 = 16$
Total de tiempo del flujo= $1+3+6+10+16 = 36$ días			
Media del tiempo del flujo = $36 : 5 = 7,2$ días			

El tiempo más breve de operación produce un tiempo promedio de flujo más breve que la regla del primero en llegar primero en salir. Además, los trabajos E y C estarán terminados antes de la fecha de vencimiento y el trabajo A sólo estará atrasado un día. En promedio, un trabajo estará atrasado $(0+0+1+4+7)/5 = 2.4$ días.

Solución:

Regla fecha de vencimiento; primera fecha de vencimiento primero. Se decide usar esta regla y el programa resultante será:

PROGRAMA DDATE

SECUENCIA DE TAREAS	TIEMPO DE PROCESAMIENTO	FECHA DE VENCIMIENTO	TIEMPO DE FLUJO
	(DÍAS)	(DÍAS A PARTIR DE HOY)	(DÍAS)
E	1	2	$0 + 1 = 1$
A	3	5	$1 + 3 = 4$
B	4	6	$4 + 4 = 8$
C	2	7	$8 + 2 = 10$
D	6	9	$10 + 6 = 16$
Total de tiempo de flujo= $1+4+8+10+16 = 39$ días			
Media del tiempo del flujo = $7,8$ días			

En este caso los trabajos B, C y D se retrasarán. En promedio, un trabajo se retrasará $(0+0+2+3+7)/5 = 2.4$ días.

Solución:

Regla último en llegar primero en salir, ALEATORIA y margen de tiempo restante. Éstos son los tiempos de los flujos sujetos a estas reglas:

SECUENCIA DE TAREAS	TIEMPO DE PROCESAMIENTO	FECHA DE VENCIMIENTO	TIEMPO DE FLUJO
	(DÍAS)	(DÍAS A PARTIR DE HOY)	(DÍAS)
PROGRAMA LCFS			
E	1	2	$0 + 1 = 1$
D	6	9	$1 + 6 = 7$
C	2	7	$7 + 2 = 9$
B	4	6	$9 + 4 = 13$
A	3	5	$13 + 3 = 16$
Total de tiempo del flujo = 46 días			
Media del tiempo del flujo = 9,2 días			
Demora promedio = 4,0 días			

PROGRAMA ALEATORIO			
D	6	9	$0 + 6 = 6$
C	2	7	$6 + 2 = 8$
A	3	5	$8 + 3 = 11$
E	1	2	$11 + 1 = 12$
B	4	6	$12 + 4 = 16$
Total de tiempo del flujo = 53 días			
Media del tiempo del flujo = 10,6 días			
Demora promedio = 5,4 días			

PROGRAMA STR				INACTIVIDAD
E	1	2	$0 + 1 = 1$	$2 - 1 = 1$
A	3	5	$1 + 3 = 4$	$5 - 3 = 2$
B	4	6	$4 + 4 = 8$	$6 - 4 = 2$

D	6	9	$8 + 6 = 14$	$9 - 6 = 3$
C	2	7	$14 + 2 = 16$	$7 - 2 = 5$
Total de tiempo del flujo = 43 días				
Media del tiempo del flujo = 8,6 días				
Demora promedio = 3,2 días				

3.5.2 Ejemplo 2.

Según Fundora Miranda (1987).

Sean cinco artículos (A, B, C, D y E) que requieren ser procesados en cinco puestos de trabajo (1, 2, 3, 4 y 5) en el mismo orden de procesamiento tecnológico. Los tiempos de procesamiento del lote de cada artículo, la carga total para cada puesto de trabajo, el valor de las ventas de cada artículo y los requerimientos de entrega en horas consideradas desde este instante se muestran en la tabla 3.3.

Se considera que el tipo de desplazamiento del objeto de trabajo es consecutivo.

Regla No. 1. Primera operación - primera más corta.

Al utilizarse esta regla los artículos o trabajos son programados acorde con la magnitud de la primera operación y su justificación es que permite que cada trabajo comience tan pronto como es posible.

Tabla 3.3. Puestos de trabajo con artículos y tiempo por lotes.

Puestos de trabajo	Artículos y tiempo por lote (h)					Carga (h)
	A	B	C	D	E	
1	5	18	12	7	19	61
2	10	20	10	30	20	90
3	20	30	10	20	30	110

4	30	30	10	10	15	95
5	25	30	20	5	32	112
Tiempo total procesamiento de c/artículo	90	128	62	72	116	468
Ventas(\$)	1500	2000	800	1200	1000	
Fecha entrega desde ahora (en horas)	100	200	80	100	250	

En el ejemplo la secuencia seleccionada será:

A – D – C – B – E

5 7 12 18 19 (tiempos de la 1ra. operación)

Para esta secuencia la duración del tiempo total de procesamiento (TTP) de todos los artículos sería de 197 horas y la duración del ciclo tecnológico de cada artículo será:

TA = 90 h, TB = 141 h, TC = 103 h, TD = 90 h, TE = 155 h, y las operaciones que definen la duración del tiempo total serán:

A1 – A2 – D2 – D3 – C3 – B3 – B4 – B5 – E5 ó

A1 – A2 – D2 – C2 – B2 – B3 – B4 – B5 – E5

Las que constituyen en ese orden dos caminos críticos¹⁰

Regla No. 2. Última operación – última más corta.

En este caso los trabajos son programados acorde con la magnitud de la última operación, programando último el trabajo con la magnitud menor.

¹⁰ Caminos críticos. La sucesión de operaciones desde la primera operación hasta la última, cuyos tiempos sumados dan el tiempo total de procesamientos.

La secuencia sería:

E – B – A – C – D

32 30 25 20 5 (tiempo de la última operación).

Para esta secuencia la duración del tiempo total de procesamiento (TTP) de todos los artículos es 209 h y la duración del ciclo tecnológico de cada uno será:

TA = 145 h, TB = 140 h, TC = 162 h, TD = 155 h, TE = 116 h y los caminos críticos:

E1 – E2 – E3 – B3 – B4 – B5 – A5 – C5 – D5 y

E1 – E2 – E3 – B3 – B4 – A4 – A5 – C5 – D5

Regla No. 3. Primera operación – primera más larga.

Programar primero aquella operación cuyo tiempo sea el mayor. La secuencia sería:

E – B – C – D – A

19 18 12 7 5 (tiempo 1ra. operación)

El tiempo total de procesamiento de todos los artículos es de 209 h igual que para la secuencia EBACD. La duración del ciclo tecnológico de cada artículo sería:

TA = 153 h, TB = 140 h, TC = 142 h, TD = 135 h, TE = 116 h y el camino crítico:

E1 – E2 – E3 – B3 – B4 – B5 – C5 – D5 – A5

Regla No. 4. Primera con tiempo de procesamiento total menor.

Programar primero aquel artículo cuyo tiempo total de procesamiento sea más pequeño, esto conduce a concluir primero aquellos trabajos cuya duración del ciclo tecnológico tienen el valor menor. Secuencia:

C – D – A – E – B

62 72 90 116 128 (tiempo total de procesamiento de cada artículo).

En este caso el tiempo total de procesamiento será de 212 h y la duración del ciclo tecnológico sería:

TA = 128 h, TB = 169 h, TC = 62 h, TD = 75 h, TE = 145 h

El camino crítico:

C1 – C2 – D2 – D3 – A3 – E3 – B3 – B4 – B5

Regla No. 5. Primera aquella con tiempo total de procesamiento mayor.

La secuencia será:

B – E – A – D – C

128 116 90 72 62 (tiempo total de procesamiento)

El tiempo total de procesamiento de todos los artículos es 210 h y la duración del ciclo tecnológico de cada uno será:

TA = 148 h, TB = 128 h, TC = 161 h, TD = 142 h, TE = 142 h, y el camino crítico:

B1 – B2 – B3 – B4 – B5 – E5 – A5 – D5 – C5

Regla No. 6. Primer valor más alto de las ventas.

La secuencia será:

B - A - D - E - C
\$2000 \$1500 \$1200 \$1000 \$800 (valor de las
ventas \$)

El tiempo total de procesamiento = 210 h, igual que en la secuencia BEADC; la duración del ciclo tecnológico de cada uno será:

TA = 135 h, TB = 128 h, TC = 161 h, TD = 135 h, TE = 160 h.

En este caso hay dos caminos críticos:

B1 – B2 – B3 – B4 – B5 – A5 – D5 – E5 – C5
B1 – B2 – B3 – B4 – A4 – A5 – D5 – E5 – C5

Regla No. 7. Relación del tiempo procesamiento total del artículo al tiempo disponible.

El tiempo disponible es el tiempo entre el posible comienzo y la fecha de entrega. En este caso sería el valor dado como fecha de entrega desde ahora en la tabla 3.4. Se selecciona a partir de la razón mayor, esta regla también es denominada razón crítica.

Tabla 3.4. Razón crítica.

Razón crítica	Trabajos				
	A	B	C	D	E
	0,900	0,640	0,775	0,72	0,464

Secuencia: A - C - D - B - E
 0.900 0.775 0.720 0.640 0.464

El tiempo total de procesamiento de todos los artículos = 199 h
 y la duración del ciclo tecnológico de cada uno será:

TA = 90 h, TB= 143 h, TC = 105 h, TD = 98 h, TE= 157 h.

Hay un camino crítico: A1 – C1 – C2 – D2 – D3 – B3 – B4 – B5 – E5.

Regla No. 8. Fecha de entrega más temprana.

Programar primero aquel trabajo con fecha de entrega más temprana. En este caso hay dos secuencias posibles:

Secuencias:
 C A D B E
 C D A B - E y
 80 100 100 200 250

Para la secuencia CADBE el TTP = 204 h y la duración del ciclo tecnológico de cada artículo será:

TA = 97 h, TB = 148 h, TC = 62 h, TD = 95 h, TE= 162 h.

Para la secuencia CDABE el TTP = 214 h, y la duración del ciclo tecnológico de cada artículo será:

TA = 126 h, TB = 158 h, TC = 62 h, TD = 75 h, TE = 172 h.

Se analiza en ambas secuencias la duración del ciclo de producción de cada artículo, se llega a la conclusión que solo la secuencia CADBE cumple esta condición. Pues en la secuencia CDABE la duración del ciclo de producción del artículo A requiere 26 horas más de las 100 horas disponibles. Se resume el resultado de las reglas anteriores que aparecen en la tabla 3.5.

Si se desea minimizar el tiempo total de procesamiento de la secuencia (TTP) se seleccionaría la secuencia ADCBE entre las nueve secuencias obtenidas aplicando estas reglas.

Combinando varias reglas de decisión en dependencia de lo que se desee minimizar se establecen diferentes algoritmos. La mayoría de los algoritmos desarrollados buscan minimizar el tiempo total de procesamiento de todos los artículos o trabajos, los cuales se comparan con el tiempo límite de procesamiento.

Tabla 3.5. Resumen de las reglas de decisión.

Regla	Secuencia	Horas					
		TTP	TA	TB	TC	TD	TE
1	ADCBE	197	90	141	103	90	155
2	EBACD	209	145	140	162	155	116
3	EBCDA	209	153	140	142	135	116
4	CDAEB	212	128	169	62	75	145
5	BEADC	210	148	128	161	142	142
6	BADEC	210	135	128	161	135	160
7	ACDBE	199	90	143	105	98	157
	CADBE	204	97	148	62	95	162
8	CDABE	214	126	158	62	75	172

3.5.3 Ejemplo 3.

A Manolo Cuervo le gustaba decir que él hacía “guitarras como churros”. En estos momentos le sería muy difícil estimar cuántas lleva hechas desde que comenzó el negocio por su cuenta en 1980.

Los inicios

Desde muy niño, Manolo Cuervo aprendió en su casa a amar la guitarra española. Su padre, Juan Cuervo, había heredado del suyo una guitarrería donde se han hecho instrumentos para lo más grandes intérpretes. Actualmente es sin duda la primera del país en prestigio. Las guitarras se hacen por exclusivo

encargo, y por su casa pasan con frecuencia las principales figuras internacionales del mundillo.

Con este ambiente familiar no es de extrañar que Manolo llegase a realizar estudios musicales de guitarra en el Conservatorio, e incluso que diese algún concierto en salas y colegios mayores.

Pero pronto se dio cuenta de que la vida de concertista era muy dura como profesión, y decidió volver al taller donde podría seguir en contacto con el instrumento.

Nuevas ideas

Manolo Cuervo tenía ideas más modernas que su padre respecto al negocio de la guitarra. Reconocía evidentemente la necesidad de la existencia de una guitarra artesanal de calidad, para expertos. Pero esas guitarras son muy caras y para una selecta minoría.

Junto a ésta veía también una demanda grande ejercida por aquellas personas amantes del instrumento, que simplemente les gusta tocar, sin entender mucho de él. Eran muchos, y la empresa familiar estuvo desde siempre fuera de ese mercado que podría ser generador de abundantes beneficios.

Con estas ideas, creó en 1980 un taller bajo su propio nombre, con el fin no influir sobre el nombre de marca Juan Cuervo.

El taller

Desde sus comienzos hasta hoy el taller ha sufrido varios cambios (más personal, más maquinaria), fruto del aumento en la demanda.

En concreto, en el departamento de sierras tiene actualmente dos equipos independientes. El primero que compró, de segunda mano, no era apropiado ya para algunos modelos y además un nuevo equipo permitía aumentar la productividad. Sin embargo, con la nueva maquinaria se incurría en mayores costos por unidad de tiempo: un 20 % más que con el antiguo, debido a que el consumo energético era considerablemente mayor.

El proceso comienza en el almacén de chapa de madera. De ahí, según el pedido, se escoge la madera adecuada y pasa a la zona de sierras donde se da la forma propicia al material. Desde ahí pasa a la zona de pintura y de ahí a la de ensamblado y pegado.

Según el pedido los procesos son distintos: el color varía, la madera varía, las cuerdas son diferentes. También es diferente por tanto el tiempo que se invierte en cada proceso según el pedido: hay guitarras más caras que necesitan mayor tiempo en la zona de pintura por el tipo de material que llevan, o que invierten más tiempo en las sierras debido a que es precisa una mayor intervención manual, e igual ocurre con el ensamblado. En la tabla siguiente puede verse el programa de producción de un día cualquiera junto con los tiempos de proceso para cada pedido.

Orden de pedidos (minutos)	Tiempos			
	sierra 1	sierra 2	pintura	ensamblaje
192343-D	40	33	240	137
192344-E	35	30	230	125
192345-B	—	48	300	160

192346-C	60	40	260	145
192347-A	—	55	340	190
192348-C	60	40	260	145
192349-D	50	30	230	125

3.6 Selección de la mejor secuencia.

Según se ha expuesto, resulta sumamente amplio el número de secuencias factibles a realizar en la ejecución de un trabajo dado, incluso como se apreciará más adelante, podrán ser varias las que satisfagan un objetivo, necesidad específica o estrategia fijada para la realización de la producción.

El compromiso con una de ellas deberá ser basado entonces en aquella que cumpla con los menores tiempos de procesamiento y por lo tanto brindarán una mayor economía al sistema. Tal selección pudiera estar sustentada en el conocimiento de los valores asociados al Tiempo Límite de Procesamiento (TLP) y al Tiempo Total de Procesamiento (TTP), de cada una de las distintas o factibles secuencias.

Antes de desarrollar los métodos para la selección de las secuencias se muestra las vías para la determinación del TLP.

3.6.1. Pasos a seguir para la determinación del TLP.

Según Fundora Miranda (1987).

1. Se determina la carga total (Q) para cada subdivisión productiva o puesto de trabajo y se selecciona la mayor (Q_{máx}).
2. Determinar el valor menor de la suma de los tiempos de procesamiento para cada uno de los artículos que se

realizan en los puestos de trabajo, anteriores al seleccionado como el de mayor carga.

3. Determinar el valor menor de la suma de los tiempos de procesamiento para cada uno de los artículos que se realizan en los puestos de trabajo, posteriores al seleccionado como el de mayor carga.
4. Calcular el TLP sumando los valores que se obtienen en los pasos anteriores.

3.6.2. Ejemplo 1.

Los n artículos o trabajos a ser procesados en las m subdivisiones productivas, se ordenan como se muestra, donde a_1, b_1, \dots, n_m son los tiempos de procesamiento de los lotes para cada uno de los artículos de cada subdivisión productiva, todos con la misma secuencia tecnológica mostrados en la tabla 3.6.

Tabla 3.6. Tiempos de procesamiento de los lotes.

Artículos	Tiempo de procesamiento de un lote (h)					Carga
	A	B	C	D	E	
P. Trabajo						
1	20	30	50	10	40	150
2	30	20	50	30	30	160
3	10	20	30	20	40	120
4	20	20	10	30	30	110
5	10	20	10	30	20	90

Se aplica el procedimiento anterior mostrado en la tabla 3.7 y se comienza con la determinación de la carga total máxima, por tanto, $Q_{\text{máx}} = 160$ h, el valor menor de los tiempos de procesamiento anterior al seleccionado es 10 h, (correspondiente al artículo D) y en cuanto a la suma de los

posteriores al valor seleccionado se tiene: $10+20+10 = 40$ (correspondiente al artículos A); entonces se suman los valores obtenidos en los pasos anteriores y se tiene que:

Tabla 3.7. Procedimiento para calcular el TLP.

Artículos P. trabajo	Tiempo de procesamiento de un lote (h)					Carga
	A	B	C	D	E	
1	20	30	50	10	40	150
2	30	20	50	30	30	160
3	10	20	30	20	40	120
4	20	20	10	30	30	110
5	10	20	10	30	20	90

TLP = 160+10+10 +20+10 = 210 h.

El tiempo obtenido puede se igual o menor que el tiempo de procesamiento obtenido para cualquiera de las secuencias obtenidas para los n trabajos en las m subdivisiones productivas. Este tiempo sirve como criterio para comparar con los valores obtenidos por las reglas de decisión o por los algoritmos, que permiten la determinación de las secuencias y así realizar la selección de aquella secuencia con menor TTP o con un valor cercano a él. El tiempo límite puede resultar un valor inferior al de cualquiera de las secuencias reales.

3.7 Métodos de secuenciación para programas ordenados.

A continuación se explicarán tres algoritmos que permiten realizar la secuenciación en programas ordenados para n trabajos cuyo orden tecnológico sea el mismo:

- **Método de Johnson** (para 2 máquinas y n trabajos).

- **Método de Johnson Modificado** (para 3 máquinas y n trabajos).
- **Método de Campbell – Dudek – Smith (C.D.S)** (para n trabajos y m puestos de trabajo).

3.7.1 Método de Johnson (para 2 máquinas y n trabajos).

Este algoritmo fue desarrollado por S. M. Johnson, Woolsey (1979) lo denomina también como: Regla de la mano izquierda - mano derecha. Se fundamenta en minimizar el tiempo total de procesamiento de todos los trabajos, pero no garantiza que la duración del ciclo tecnológico sea menor. Ofrece la posibilidad de encontrar un orden de fabricación que minimiza el tiempo total de procesamiento. El mismo es aplicable cuando existen dos máquinas y en ellas van a ser procesados o realizados n trabajos, que pasarán por las dos máquinas empezando siempre por una de ellas.

Para poder aplicar cada método es necesario que se cumplan determinados requisitos:

- Debe existir solamente dos puestos de trabajo.
- Todos los trabajos deben pasar del puesto de trabajo x al puesto de trabajo y , nunca a la inversa.
- Ningún trabajo debe comenzar hasta que no esté completamente terminado en el puesto de trabajo x (modelo consecutivo).
- Los tiempos de procesamiento para el lote de cada trabajo $(X_i; Y_i)$ sean conocidos.

El procedimiento según Ackoff Buisell, C. (1977), Sasieni, Y. (1970), Fundora Miranda, A. (1987), Company Pascual, R. y Coromis Subias, A. (1994), y Maynard, es el siguiente:

1. Se deben colocar en una tabla las dos máquinas, los trabajos que se van a realizar en ellas; así como los

tiempos que se demoran o que se requieren para realizar cada trabajo en cada máquina. Para facilitar el trabajo se utilizará un convenio, que consiste en denominar la primera máquina por donde deben pasar las tareas, como "x" y la segunda como "y". Esta denominación se hace en dependencia del programador por lo que puede utilizar cualquier letra, número, símbolo, etc.

2. Una vez reflejado todos los datos en la tabla se pasa a analizar los tiempos de cada trabajo en cada puesto de trabajo y se selecciona el valor menor.
3. Si el valor determinado cae dentro de la fila correspondiente a la máquina "x" se asigna de primera en la secuencia. En caso de que este valor se encuentre en la fila "y" pasa al final de la secuencia.
4. Tachar la tarea asignada y continuar asignando detrás del primero o antes del último siguiendo el mismo criterio anterior.

Puede suceder que ocurra un empate: El mismo valor de tiempo en la misma máquina o en las dos máquinas de forma simultánea. En ambos casos existirá más de un programa o secuencia que minimiza el tiempo total de procesamiento en dependencia de la cantidad de números que tienen empatados. Una secuencia con la tarea en un lugar, y otra con la tarea en el otro lugar que le corresponde debido al empate. Se explicará la aplicación práctica del algoritmo a través de un ejemplo de $m=2$ y $n=8$ y los trabajos se denominan: A, B, C, D, E, F, G, H.

1. Colocar los trabajos en una tabla con el formato siguiente.

Puestos de Trabajo	Tiempo de procesamiento (horas)							
	A	B	C	D	E	F	G	H
M-1	8	10	14	5	9	13	20	26
M-2	13	11	7	5	28	20	14	4

2. Seleccionar el menor valor de los tiempos de cada trabajo en los puestos de trabajo. Si está en el puesto de trabajo que realiza la primera operación (M-1), el trabajo debe ser programado primero; si estuviera en el puesto de trabajo que realiza la segunda operación (M-2), el trabajo debe ser programado de último. Si hay empate seleccionar ambos. Esto indica que existirá más de un programa que minimiza el TTP.
3. Después de programado el trabajo debe ser tachado. Se repetirán el paso 2 y 3 para los restantes trabajos.
4. La secuencia resultante es el programa que minimiza el tiempo total de procesamiento.

El resultado de la aplicación del método Johnson se muestra en la tabla 3.8.

Tabla 3.8.Aplicación del método de Johnson.

Puestos de Trabajo	Tiempo de procesamiento (horas)							
	A	B	C	D	E	F	G	H
M-1	8	10	14	5	9	13	20	26
M-2	13	11	7	5	28	20	14	4

								H
--	--	--	--	--	--	--	--	---

M-1	8	10	14	5	9	13	20	
-----	---	----	----	---	---	----	----	--

Programación de la Producción

M-2	13	11	7	5	28	20	14	
-----	----	----	---	---	----	----	----	--

							D	H
D								H

M-1	8	10	14		9	13	20	
M-2	13	11	7		28	20	14	

						C	D	H
D							C	H

M-1	8	10			9	13	20	
M-2	13	11			28	20	14	

A						C	D	H
D	A						C	H

M-1		10			9	13	20	
M-2		11			28	20	14	

A	E					C	D	H
D	A	E					C	H

M-1		10				13	20	
M-2		11				20	14	

A	E	B				C	D	H
D	A	E	B				C	H

M-1						13	20	
-----	--	--	--	--	--	----	----	--

M-2						20	14	
-----	--	--	--	--	--	----	----	--

A	E	B	F	G	C	D	H
D	A	E	B	F	G	C	H

3.7.2. Método de Johnson Modificado (para 3 puestos de trabajo y n trabajos).

Este caso es una variante del caso anterior donde deben cumplirse las mismas restricciones para los tres puestos de trabajo (denotados por x, y, z) y además solo puede utilizarse cuando se cumplan las siguientes condiciones:

$$\text{Mín } X_i \geq \text{Máx } Y_i \text{ ó } \text{Mín } Z_i \geq \text{Máx } Y_i$$

Dónde: X_i , Y_i , Z_i : Tiempo de procesamiento tecnológico del lote en el puesto de trabajo x, y, z respectivamente.

Para la solución de este problema se introducen dos puestos de trabajo ficticios G y H donde los tiempos de procesamiento serán igual a:

$$G_i = X_i + Y_i$$

$$H_i = Z_i + Y_i$$

Una vez creado estos puestos de trabajo se procede a aplicar el método anterior. Ver tabla 3.8.

A continuación se muestra un ejemplo para la comprensión del método Johnson Modificado. Ver tabla 3.9.

1. Se prueba si se cumple la restricción.

$$\text{Mín } X_i = 13$$

$$\text{Mín } Z_i = 6$$

$$\text{Máx } Y_i = 12$$

Por tanto se cumple que $\min. X_i > \max. Y_i$, por lo que se puede aplicar el algoritmo Johnson Modificado.

Tabla 3.9. Tiempos de procesamiento.

PUESTOS DE TRABAJO	TRABAJOS				
	A	B	C	D	E
X	14	19	22	13	24
Y	9	11	12	12	10
Z	13	9	6	7	15

Crear los dos puestos de trabajo ficticios G y H.

PUESTOS DE TRABAJO	TRABAJOS				
	A	B	C	D	E
G	23	30	34	25	34
H	22	20	18	19	25

Se procede a aplicar el Método de Johnson para el caso de 2 máquinas y n trabajo, y se obtiene:

G	23	30	34	25	34
H	22	20	18	19	25

					C
--	--	--	--	--	---

G	23	30		25	34
H	22	20		19	25

				D	C
--	--	--	--	---	---

G	23	30			34
H	22	20			25

			B	D	C
--	--	--	---	---	---

G	23				34
H	22				25

E	A	B	D	C	
---	---	---	---	---	--

3.7.3 Método de Campbell – Dudek – Smith (C.D.S) (para n trabajos y m puestos de trabajo).

Este algoritmo fue encontrado por los autores Campbell – Dudek – Smith por lo que se denomina con ese nombre. El mismo llega aproximadamente a resolver el problema de n trabajos y m subdivisiones, y establece como óptimo, el menor tiempo total de procesamiento entre todas las secuencias calculadas.

En los estudios sobre la secuenciación de programas ordenados, las secuencias calculadas por este método se consideran óptimas.

El algoritmo establece un número de iteraciones que genera dos puestos de trabajo ficticios, a los cuales se le determina la secuencia óptima, utilizando el algoritmo de Johnson. A la secuencia o secuencias obtenidas se le determinan, a partir de la matriz inicial el tiempo total de procesamiento de todos los trabajos. Aquella secuencia cuyo valor de tiempo total de procesamiento sea menor, es la que se toma como óptima o secuencia cerca del óptimo.

Procedimiento para la aplicación del método.

1. Para una matriz de n . m se determina el tiempo de procesamiento de dos puestos de trabajo ficticios (x , y). Los tiempos para la primera iteración son determinados por:
 - Tiempo de procesamiento de X es igual al tiempo de procesamiento de los artículos, en el primer puesto de trabajo.

- Tiempo de procesamiento de Y es igual al tiempo de procesamiento de los artículos en el último puesto de trabajo.

Para la segunda iteración:

- Tiempo procesamiento de X es igual a la suma de los tiempos del primero y segundo puesto de trabajo.
- Tiempo de procesamiento de Y es igual a la suma de los tiempos del último y antepenúltimo puesto de trabajo.

En general para la k-ésima iteración:

- Tiempo procesamiento de X es igual a la suma de los tiempos para los primeros k puestos de trabajo.
 - Tiempo procesamiento de Y es igual a la suma de los tiempos para los últimos k puestos de trabajo.
2. A los puestos de trabajo – ficticios resultantes de cada iteración se le aplica el algoritmo de Johnson y se obtiene una secuencia.
 3. A cada secuencia obtenida se le determina a partir de la matriz $n \cdot m$ el tiempo total de procesamiento y se aplican las gráficas de Gantt o la teoría de las redes.

Se genera $m - 1 = k$ iteraciones.

3.7.3.1. Ejemplo.

Para la explicación del algoritmo, se utilizará el ejemplo siguiente:

Sea el caso de $n = 5$ y $m = 5$, cuyos tiempos de procesamiento expresados en días se dan en la tabla 3.10.

En este caso se generan $K = m - 1 = 4$ iteraciones.

Se determina la primera iteración $k = 1$ tabla 3.11

Tabla 3.10. Tiempos de procesamiento.

Puestos de Trabajo	Tiempo de Procesamiento (días)				
	A	B	C	D	E
P-1	4	5	7	3	6
P-2	5	4	6	4	3
P-3	3	4	5	4	6
P-4	4	3	3	5	3
P-5	3	4	3	5	4

Tabla 3.11. Primera iteración.

Puestos de Trabajo Ficticios	A	B	C	D	E
X (= 1)	4	5	7	3	6
Y (= 5)	3	4	3	5	4

Se le aplica el método de Johnson y se obtienen las secuencias:

DEBCA, DEBAC, DBECA, DBEAC.

Se procede a la segunda iteración $k = 2$.

Tabla 3.12.

Puestos de Trabajo Ficticios	A	B	C	D	E
X (= 1 + 2)	9	9	13	7	9
Y (= 5 + 4)	7	7	6	10	7

Se aplica el método de Johnson para la matriz resultante y se generan las secuencias:

DABEC, DEBAC, DEABC, DBEAC, DAEBC, DBAEC.

Para la tercera iteración $k = 3$.

Tabla 3.13.

Puestos de Trabajo Ficticios	A	B	C	D	E
X (= 1+2+3)	12	13	18	11	15
Y (= 5+4+3)	10	11	11	14	13

Se aplica el método de Johnson para la matriz resultante y se generan las secuencias:

DEBCA, DECBA.

Para la cuarta iteración $k = 4$.

Tabla 3.14.

Puestos de Trabajo Ficticios	A	B	C	D	E
X (1+2+3+4)	16	16	21	16	18
Y (5+4+3+2)	15	15	17	18	16

Se aplica el algoritmo de Johnson y se obtienen las secuencias:

DCEBA, DCEAB.

En la tabla 3.15.se muestra la resultante del cálculo del TTP en días para cada iteración.

Tabla 3.15. Tiempo total de procesamiento.

Iteraciones	Tiempo total de procesamiento en días
1	28
2	53
3	79
4	102

Se puede llegar a la conclusión que las secuencias óptimas en este ejemplo son: DEBCA, DEBAC, DBECA y DBEAC, ya que son las que se producen en el menor tiempo de procesamiento.

3.7.4 Método de valoración de trabajo (Vti)

Sus condiciones de aplicación son similares al C-D-S:

- Desplazamiento consecutivo
- Programas ordenados
- Tiempo referido al lote de piezas
- N trabajos y m puestos

Procedimiento:

1. Cálculo de los coeficientes k_i para cada trabajo i

$$K_i = 1 \quad \text{si } t_{\text{primero}} \geq t_{\text{último}} \quad /4/$$

$$K_i = -1 \quad \text{si } t_{\text{primero}} < t_{\text{último}}$$

2. Cálculo del parámetro X_i para cada trabajo "i".

X_i Menor de la suma de las operaciones sucesivas.

3. Cálculo de la valoración de cada trabajo "i" (V_{ti})

$$V_{ti} = k_i / X_i$$

4. Ordenar los trabajos por el V_{ti} de menor a mayor.

Ejemplo:

Tabla 3.16 Tiempos de procesamiento.

Puestos de Trabajo	Tiempo de procesamiento en días				
	A	B	C	D	E
1	4	1	3	4	2
2	3	6	1	2	5
3	5	7	6	3	2
4	4	4	2	6	3

Primero: se calculan de los coeficientes k_i para cada trabajo según expresión /4/. Ver tabla 3.17.

Para A $4 = 4$ $k_i = 1$
 B $1 < 4$ $k_i = -1$
 C $3 > 2$ $k_i = 1$
 D $4 < 6$ $k_i = -1$
 E $2 < 3$ $k_i = -1$

Segundo: se calcula el parámetro X_i para cada trabajo "i".

Para A $4 + 3 = 7, 3 + 5 = 8, 5 + 4 = 9;$ $X_1 = 7$
 B $1 + 6 = 7, 6 + 7 = 13, 7 + 4 = 11;$ $X_2 = 7$
 C $3 + 1 = 4, 1 + 6 = 7, 6 + 2 = 8;$ $X_3 = 4$
 D $4 + 2 = 6, 2 + 3 = 5, 3 + 6 = 9;$ $X_4 = 5$
 E $2 + 5 = 7, 5 + 2 = 7, 2 + 3 = 5;$ $X_5 = 5$

Tabla 3.17 Aplicación del método Vti.

Puestos de Trabajo	Tiempo de procesamiento en días				
	A	B	C	D	E
1	4	1	3	4	2
2	3	6	1	2	5
3	5	7	6	3	2
4	4	4	2	6	3
Ki	1	-1	1	-1	-1
Xi	7	7	4	5	5
Vti	01-jul	-0,143	01-abr	-0,2	-0,2

Secuencia: E D B A C
D E B A C

3.7.5 Métodos exactos de solución

Se ha comentado que el problema de la secuenciación es de una gran complejidad, aunque no imposible de solucionar. Pues si se dispusiese de tiempo suficiente, siempre cabría la posibilidad de enumerar una a una todas las soluciones factibles y entre ellas escoger la mejor. En ocasiones resulta factible obtener la solución óptima sin la necesidad de aplicar este procedimiento.

El estudio de los talleres con una sola máquina, es de interés, no solo porque en ocasiones toda la planta puede considerarse como un único procesador (industria química), o porque la decisión a tomar es precisamente frente a una máquina reconocida como el cuello de botella del proceso y determinar entonces en gran medida la eficiencia del proceso. Estos procedimientos pueden ser importantes para dar solución a problemas más complejos.

Cuando el número de máquinas es uno y son varios los trabajos que se desean procesar, la duración de cualquier solución coincidirá siempre con el valor $t_1 + t_2 + t_3 + \dots + t_n$, desde el momento en que no se produzcan inactividades en las máquinas y que se procesen todos los trabajos ininterrumpidamente uno tras otro. Se necesitaría un criterio que trate de minimizar el máximo retraso. Jackson en 1955, definió una regla sencilla: Procesar los trabajos de acuerdo con la fecha de entrega comprometida, según orden ascendente.

Aunque se minimiza el retraso total, es posible al aplicar la regla de Jackson que todos o casi todos los trabajos estén retrasados. Si el objetivo es minimizar el número de trabajos a entregar más tarde de lo deseado, se debe aplicar la denominada regla de Moore, según la cual, una vez aplicada la regla de Jackson y para cuando el número de trabajos retrasados sea mayor que dos, la solución puede ser mejorada identificando el primer trabajo que terminará con retraso, luego se busca el trabajo con mayor tiempo de elaboración entre los comprendidos por el primero de los artículos en la secuencia y el primer retrasado encontrado. Este artículo se considera retrasado sin remedio y pasa al final de la secuencia, repitiendo el procedimiento para los trabajos que resten.

Otro método es el ROT (*Runout Time*), indicador de los períodos (semanas, días, etc.) para los cuales está cubierta la demanda sobre la base de los *stocken* almacén. Se define para cada artículo como el cociente entre la demanda por período base y el inventario actual. (Se supone que la producción es a demanda o tasa constante y determinística)

$$\text{ROT} = \frac{\text{Inventario actual de } J_i}{\text{Demanda de } J_i \text{ en un período}}$$

Se calcula ROTi para todos los trabajos restantes, y se selecciona para ser procesado aquel para el cual se obtenga un valor menor, es decir, será el que posea menos stock en función de su demanda.

Ejemplo.

Una familia de productos está compuesta por tres lotes, cuyos datos determinísticos pueden verse en la siguiente tabla:

Lotes	Inventario actual	Demanda semanal	Tamaño del lote	Capacidad de producción (u./semana)
L1	350	100	300	600
L2	550	100	300	100
L3	300	100	300	150

Cálculo del coeficiente ROT

$$\text{ROT1} = 350 / 100 = 3.5$$

$$\text{ROT2} = 550 / 100 = 5.5$$

$$\text{ROT3} = 300 / 100 = 3$$

Por tanto el primer lote a producir será L3, por poseer menor valor. Al cabo de 300/150 semanas (tamaño del lote/capacidad productiva) se habrá completado la producción de las 300 unidades del lote. En ese tiempo se consumieron $2 \times 100 = 200$ unidades de L1, L2, L3 siendo las existencias de:

$$\text{L1} = 350 - 200 = 150$$

$$\text{L2} = 550 - 200 = 350$$

$$\text{L3} = 300 - 200 + 300 = 400$$

Siendo necesario calcular nuevamente el coeficiente ROT y decidir, obteniendo:

Si se necesitase finalizar los trabajos en una fecha determinada, es posible que el método anterior no satisfaga este requisito.

Al realizar los lanzamientos por lotes completos, para algún trabajo, el tiempo necesario puede ser elevado haciendo que no sea posible finalizarlos todos en la fecha comprometida, aunque quizás no sea necesario producir todo el lote si utilizamos las existencias en almacén y así cumplir con los plazos de entrega.

Otra idea es la que utiliza el método AROT (*Agregaterunout time*). El coef. AROT se calcula como el cociente entre el tiempo disponible (suma de los tiempos de producción que el inventario nos ahorra y el tiempo de que se dispone hasta la fecha límite), y el tiempo necesario para cubrir la demanda prevista.

Supongamos que en el ejemplo es necesario finalizar la producción en el plazo de 5 semanas (menor a las 5,5 semanas) que se ha obtenido aplicando el método ROT. El tiempo de producción que se puede ahorrar en cada lote haciendo uso de los inventarios será:

Tiempo de producción que se puede ahorrar (Tpa):

$T_{pa} = \text{Inventario} / \text{capacidad}$

$T_{paL1} = 350 / 600 = 0,583 \text{ semanas}$

$T_{paL2} = 550 / 100 = 5,5$ “

$T_{paL3} = 300 / 150 = 2,0$ “

Tiempo necesario para cubrir la demanda (Tcd)

Tcd = Demanda / Capacidad

Tcd1 = 100/ 600 = 0,167 semanas

Tcd2 = 100 / 100 = 1,0 “

Tcd3 = 100 / 150 = 0,67 “

Tiempo que se dispone hasta la fecha límite (Tfl) = 5 semanas

$$\text{Coeficiente AROT} = \frac{\sum T_{pa} + T_{fl}}{\sum T_{cd}} = \frac{(0.58 + 5.5 + 2) + 5}{(0.167 + 1 + 0.67)}$$

Los requisitos brutos dado el coeficiente AROT, se obtienen como el producto de este coeficiente por la demanda prevista en el período. Restando a estos requisitos brutos los inventarios, se obtienen los requisitos netos, o cantidad necesaria a producir.

Requisitos brutos, la demanda es igual a 100 unidades/semana

$$L1=L2=L3= 7,12 \times 100 = 712$$

Restando de los requisitos brutos los inventarios se obtienen los requisitos netos:

$$L1 = 712 - 350 = 362$$

$$L2 = 712 - 550 = 162$$

$$L3 = 712 - 300 = 412$$

Si en vez de producir 300 unidades de L1, L2, y L3 (como indica el tamaño de los lotes) se producen 336,2, 162 y 412 respectivamente, se cubrirían las demandas en el plazo de 5 semanas.

3.7.6 Ejercicios integrador.

Se desea realizar y analizar la secuenciación de la producción de un taller que posee seis líneas productivas y en la que se realizan 22 artículos. Las características de las distintas líneas y sus jefes de exponen a continuación:

Línea N° 1: Utiliza los equipos denominados como No 1 y No 2 y se dedica a los artículos A,B,C y D, todos con idéntica secuencia de producción (1-2), producción en lotes y tiempos de elaboración en días/ lote como se muestra:

PT	A	B	C	D
1	A1 1	3	6	8
2	A2 9	8	2	5
Lotes	1000	1200	900	1400
F. Entrega	12	20	22	26

Línea N° 2: Utiliza los equipos 3,4 y 5 para elaborar las piezas E, F, G y H, todos con la misma secuencia de elaboración (3 a 5) y producción por lotes. Los tiempos expresados en días/lotes son:

PT	E	F	G	H
3	E1 9	F1 8	7	8
4	E2 2	F2 4	3	5
5	E3 3	F3 6	8	9
Lote	800	1000	900	700
F. Entrega	40	35	22	27

Estas dos líneas se encuentran bajo la dirección de Pedro, persona que gusta y siempre que le resulta posible realiza la

programación por los criterios de Jhonson y Johnson Modificado, buscando garantizar la solución óptima a la programación. En su defecto utiliza CDS.

Línea N° 3: Esta línea es dirigida por Rolando, que al poseer bajo su dirección las máquinas 6,7,8,9 y 10 y trabajar con un programa ordenado para las piezas I,J y K se encuentra aferrado desde hace años a la realización de la secuenciación por el método de CDS.

En este caso los tiempos de días/ lotes son:

PT/	I	J	K
6	11 8	9	5
7	12 4	10	4
8	13 3	11	3
9	14 2	12	2
10	15 8	6	6
Lote	600	400	500
F. Entrega	26	50	24

Rolando analiza siempre todas las variantes posibles; y selecciona aquella que garantice una menor duración en su elaboración. No obstante, en los últimos tiempos ha comenzado a calcular el TLP y selecciona la primera de las variantes que su TTP exceda en menos de dos días al límite, sin probar los restantes.

Línea N° 4: Es dirigida por Armando que gusta introducir en la práctica todo lo que recientemente se ha estudiado. El también dirige la línea No 5 y acaba de cursar un Post grado, donde recibió los métodos de valoración de los puestos de trabajo y el método de los seis pasos, por lo que no ha perdido la oportunidad de aplicarlas.

La línea 4 también presenta un programa ordenado de producción destinados a los artículos L, M, N y utiliza los puestos de trabajo 11, 12,13 y 14 con producciones por lotes y tiempos como se muestran:

PT/	L	M	N
11	L1 7	5	4
12	L2 3	2	3
13	L3 2	5	8
14	4	1	2
Lote	800	900	700
F. Entrega	30	20	20

Línea N° 5: Es la primera de las líneas que presenta un programa no ordenado, utilizando los puestos de trabajo 15 y 16 para realizar los artículos: O, P, Q, R y S. Los vectores muestran la secuencia u orden tecnológicos de los artículos.

Vectores O: 15 a 16; P 16 a 15 y S 16 a 15.

PT	O	P	Q	R	S
15	7	4	6		5
16	6	3		4	6
Lote	800	900	1000	600	800
F. Entrega	22	26	16	15	24

Línea N° 6 y puesto de trabajo de pintura: Estas dos actividades son dirigidos por Juan Carlos que resulta el jefe más experimentado. La línea 6 se dedica a la producción de los artículos T, U y V, que son elaborados en los equipos del 17 al 21 pero no poseen la misma secuencia de elaboración según se muestra a continuación:

Vectores

T: de 17 a 18 a 19 a 20 a 21 y sale

U: 17 a 19 a 18 a 21 a 20 y sale

V: 17 a 18 a 20 a 19 a 21 y sale

PT	T	U	V
17	8	9	3
18	3	4	2
19	4	6	1
20	6	5	6
21	7	8	4
Lote	700	800	900
F. entrega	34	30	20

El jefe gusta de tener el taller lo más despejado posible y secuencia utilizando reglas de decisión, primando en él aquella que garantice la menor duración del ciclo de producción y menor flujo dentro del sistema. (SPT)

El puesto de trabajo N°. 22 es dedicado a la pintura. Todos los productos son pintados una vez elaborados en sus líneas y la demora en la elaboración de un lote en cualquiera de los artículos es: 1 día. Este puesto de trabajo se considera el cuello de botella del taller.

A: 1 B: 1.25 C: 1.5 D: 1.75 E: 2 F: 2.25 G: 2.5

H: 2.75 I: 3 Y LUEGO nuevamente POR EL 1.

Usted deberá:

- a) Construir un gráfico de Gantt que permita analizar la propuesta de ejecución del programa productivo.
- b) Realice comentarios en cuanto:
- Cumplimiento de las fichas de entrega
 - Tiempos ociosos para equipos y piezas
 - Cuándo se pueden comenzar nuevas producciones
 - Criterios que justifican los métodos propuestos en cada caso
 - Situación para el puesto de trabajo 22
 - Otros aspectos de interés

Si se dan los precios pudiera complicarse más el análisis, too ver capacidad.

Varia nte	A 1	A 2	E 1	E 2	E 3	F 1	F 2	F 3	I 1	I 2	I 3	I 4	I 5	L 1	L 2	L 3
1	1	9	9	2	3	8	4	6	8	4	3	2	8	7	3	2
2	2	8	8	1	4	7	3	5	9	3	2	2	7	6	2	1
3	3	7	7	3	5	6	4	6	6	2	4	1	6	7	3	2
4	1	6	6	2	3	7	5	4	7	4	3	2	5	6	3	2
5	2	5	8	1	5	6	4	7	9	5	4	1	6	7	4	3
6	3	8	9	2	6	7	6	8	7	4	5	2	6	6	4	2
7	3	7	8	1	6	6	2	5	8	3	2	3	5	8	2	2
8	1	7	7	2	7	7	3	6	6	5	3	4	5	7	2	1
9	2	9	6	3	6	8	4	7	7	4	4	3	7	8	3	1
10	3	6	5	4	8	9	5	6	9	3	4	2	8	7	3	2
11	1	6	9	2	3	8	4	6	9	5	4	1	6	6	2	1
1	2	5	8	1	4	7	3	5	7	4	5	2	6	7	3	2
2	3	8	7	3	5	6	4	6	7	4	3	2	5	6	3	2
13	2	9	6	2	3	7	5	4	6	5	3	4	5	7	4	3
14	3	6	8	1	5	6	4	7	7	4	4	3	7	6	4	2
15	1	9	9	2	6	7	6	8	9	3	4	2	8	8	2	2

16	2	8	8	1	6	6	2	5	6	5	3	4	5	7	2	1
17	3	7	7	2	7	7	3	6	8	4	3	2	8	8	3	1
18	1	7	6	3	6	8	4	7	9	3	2	2	9	7	3	2
19	2	9	5	4	8	9	5	6	6	2	4	1	6	6	2	1
20	3	6	9	2	3	8	4	6	8	4	3	2	8	7	3	2
21	1	9	7	2	7	7	3	6	8	4	3	2	8	6	2	1
22	2	8	6	3	6	8	4	7	9	3	2	2	7	7	3	2
23	3	7	5	4	8	9	5	6	6	2	4	1	6	6	3	2
24	1	6	9	2	3	8	4	6	7	4	3	2	5	7	4	3
25	2	5	7	3	5	6	4	6	9	5	4	1	6	6	4	2
26	3	8	6	2	3	7	5	4	7	4	5	2	6	8	2	2
27	3	7	8	1	5	6	4	7	8	3	2	3	5	7	2	1
28	1	7	9	2	6	7	6	8	6	5	3	4	5	8	3	1
29	2	9	8	1	6	6	2	5	7	4	4	3	7	7	3	2
30	3	6	9	2	6	7	6	8	9	3	4	2	8	6	2	1

3.8. Preguntas de autocontrol de secuenciación

1. ¿Cuál es el objetivo que se persigue con la secuenciación dentro del programa de producción?
2. Mencione las reglas de decisión y diga cuáles son sus ventajas y limitaciones.
3. Diga los métodos más factibles para realizar la secuenciación.

TEMA 4.

La Temporización como función dentro de la Programación de la Producción

Tema 4. La Temporización como función dentro de la Programación de la Producción.

4.1. Aspectos generales de la temporización

Una vez determinadas cuáles serán las secuencias a seguir en el proceso productivo, se hace necesario calcular el tiempo total de procesamiento de todos los artículos que la componen. Aunque no son las únicas, existen tres variantes para su cálculo:

- La utilización de los gráficos de Gantt.
- La utilización de la teoría de las redes.
- La utilización del método tabular.

4.1.1 Aplicación del método del gráfico de Gantt

La gráfica de Gantt ya vista en el tema 1, epígrafe 1.12.1, es también uno de los métodos que permite determinar la fecha de inicio y terminación de cada operación en cada puesto de trabajo, la duración total del ciclo de producción de cada artículo, así como el tiempo de procesamiento total de cada trabajo.

Este método es útil tanto para programas ordenados como para los no ordenados, así como para cualquier tipo de desplazamiento del objeto de trabajo.

4.1.1.1. Ejemplo

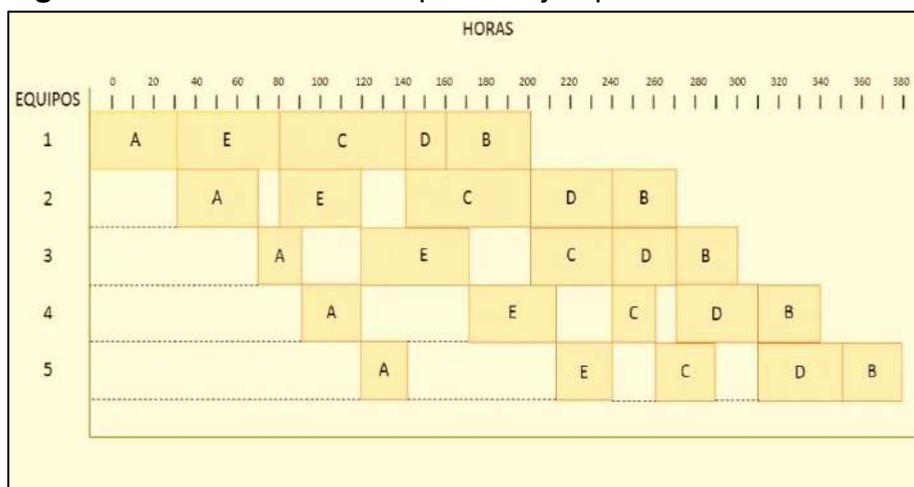
Realice un gráfico de Gantt para una secuencia de operaciones A - E - C - D - B, y tenga en cuenta los siguientes datos mostrados en la tabla 4.1.

Tabla 4.1. Datos para el ejemplo.

Artículos P. trabajo	Tiempo de procesamiento de un lote (horas)					Carga
	A	B	C	D	E	
1	30	40	60	20	50	160
2	40	30	60	40	40	170
3	20	30	40	30	50	130
4	30	30	20	40	40	120
5	20	30	20	40	30	100

En la figura 4.1.se muestra la gráfica de Gantt como resultado de la aplicación del método para la secuencia AECDB.

Figura 4.1. Gráfica de Gantt para el ejemplo.



4.1.2 Aplicación de la teoría de las redes

La teoría de las redes: Se aplica a partir de considerar que la secuencia tecnológica puede programarse en una red donde cada operación se relaciona con la precedente y su sucesora en el ciclo tecnológico de cada artículo. Este método solo es factible utilizarlo en el caso de desplazamiento consecutivo y cuando el orden tecnológico de las operaciones es el mismo para cada artículo (programas ordenados). El procedimiento a seguir es el siguiente:

- a) Establecer la secuencia de los n trabajos en las m subdivisiones productivas a la que se desea hallar el TTP.
- b) Disponer los trabajos en una red de forma que dentro del círculo se coloque el tiempo de procesamiento del lote a fabricar en las operaciones correspondientes a cada artículo. (Ver figura 4.2).
- c) Construida la red se procede a determinar la fecha de iniciación que debe ser 0, este valor se coloca en la parte superior izquierda del nodo y después de terminada la primera operación en el primer puesto de trabajo, se realiza la siguiente pregunta: ¿Qué operaciones pueden realizarse?
- d) Como se observa en la figura 4.2 puede realizarse la segunda operación (a2) en el puesto de trabajo 2 y la primera operación del artículo b, en el puesto de trabajo 1. Determinándose la terminación más temprana (a2, b1) sumándole a la iniciación de la operación A1 su duración ($0 + a1$) se obtiene la terminación más temprana, este número se coloca en la parte superior izquierda de los nodos A2 y B1. Así se procede con cada operación (nodo), cuando a un nodo le anteceden dos operaciones

su fecha de iniciación más temprana será la terminación mayor entre las dos operaciones que anteceden.

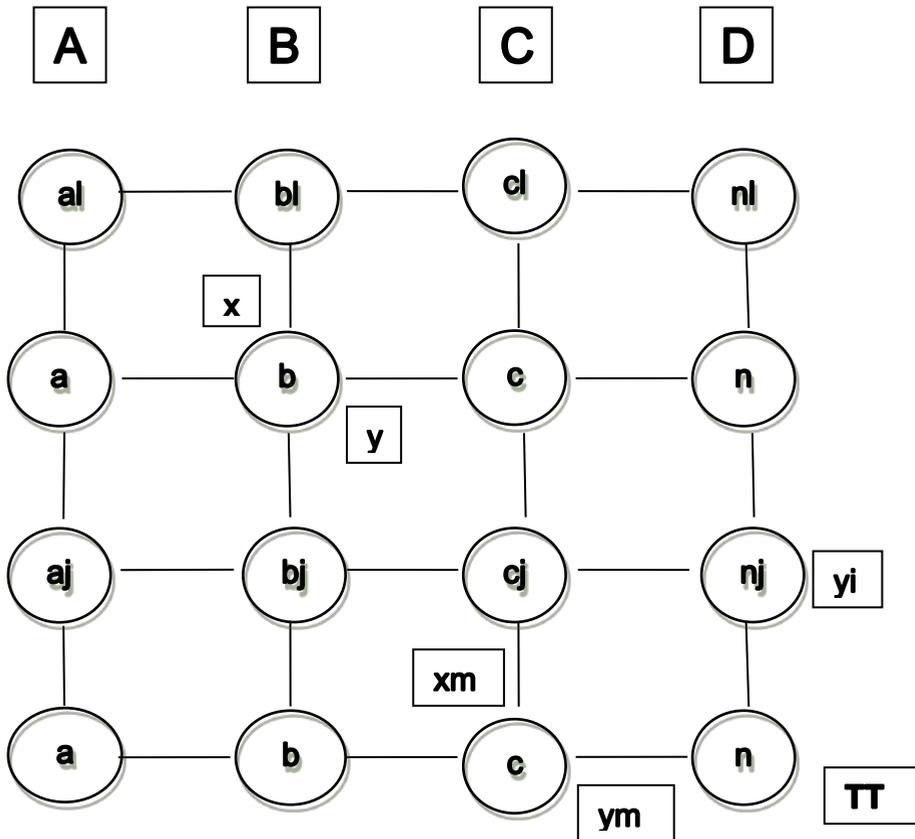
Esto se repite para cada operación hasta llegar a la operación final (nodo final), al que al sumarle el tiempo de su iniciación más temprana, la duración de la operación como resultado, es el tiempo total de procesamiento para los n trabajos en las m subdivisiones productivas.

Si se desea conocer cuáles serían las operaciones que determinan la duración del TTP, o sea, las operaciones críticas o que no tienen holgura, se procede a calcular el tiempo de iniciación más alejado de cada operación. Se procede a partir del tiempo total de procesamiento de la secuencia, restándole la duración de la última operación, el valor obtenido se recalcula en la parte inferior derecha del nodo.

Los valores de los restantes nodos se determinan a partir de restarle al tiempo de iniciación más alejado de una operación, el tiempo de duración de la operación precedente. Cuando una operación (nodo) tiene dos operaciones sucesivas se seleccionan con su tiempo de iniciación más alejado el valor menor.

Se parte del nodo nm hasta el nodo inicial, en aquellos nodos donde $x_m = y_m$ se consideran nodos críticos (operaciones críticas) los cuales definirán la duración total de procesamiento de los n artículos por las m subdivisiones productivas (TTP).

Figura 4.2. Red de aplicación al método de las redes.



4.1.2.1 Ejemplo.

A continuación se muestra un ejemplo para mostrar la aplicación del método de las redes.

Se tienen cinco artículos (A, B, C, D y E) que requieren ser procesados en ocho puestos de trabajo (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 y 8). Los tiempos de procesamiento de cada artículo del lote se muestran a continuación:

Puestos de trabajo	Artículo y tiempo por lote (horas)				
	A	B	C	D	E
1	5	4	8	2	3
2	3	2	1	4	5
3	3	2	4	3	5
4	3	4	5	7	5
5	4	2	3	5	4
6	2	3	4	2	5
7	1	2	1	3	2
8	4	2	1	4	4

- a) Calcule el TTP para la secuencia E D A C B.
- b) Diga cuáles son las operaciones críticas.
- c) Diga cuáles son los caminos críticos.

En la figura 4.3 se muestra el resultado final para la secuencia indicada. De esta se obtiene que las operaciones críticas son: E1, E2, E3, E4, D4, D5, A5, C5, C6, B6, B7, B8, correspondientes a los nodos sombreados que dan lugar al camino crítico.

Los caminos críticos son los que están integrados por operaciones que forman una ruta desde el nodo inicial hasta el nodo final y la suma de sus tiempos da el valor del TTP (h), de todos los artículos o trabajos igual a 48 h. En este caso, el camino crítico es:

E1- E2 - E3 - E4 - D4 - D5 - A5 - C5 - C6 - B6 - B7 - B8

Las informaciones que pueden obtenerse por este método son:

1. Tiempo total de procesamiento (TTP) de n trabajos en m subdivisiones productivas.

Para el ejemplo: $TTP = 3+5+5+5+7+5+4+3+4+3+2+2 = 48$ h.

2. Duración del ciclo productivo para cada artículo.

Para el ejemplo: $T_a = 43$ h; $T_b = 48$ h; $T_c = 44$ h; $T_d = 39$ h; $T_e = 33$ h.

3. Operaciones críticas.

Para el ejemplo: E1, E2, E3, E4, D4, D5, A5, C5, C6, B6, B7, B8

4. Tiempo de trabajo de cada puesto: W_m y tiempo ocioso To .

Para el ejemplo:

$W_1 = 22$ h

$To_1 = 0$

$W_2 = 15$ h

$To_2 = 6$

$W_3 = 17$ h. $To_3 = 1$

$W_4 = 24$ h

$To_4 = 0$

$W_5 = 18$ h

$To_5 = 3$

$W_6 = 16$ h

$To_6 = 6$

$W_7 = 9$ h

$To_7 = 10$

$W_8 = 15$ h.

$To_8 = 4$

5. Tiempo de espera u ocioso del artículo en proceso entre puestos de trabajo.

Para el trabajo:

Art. A: 13 h

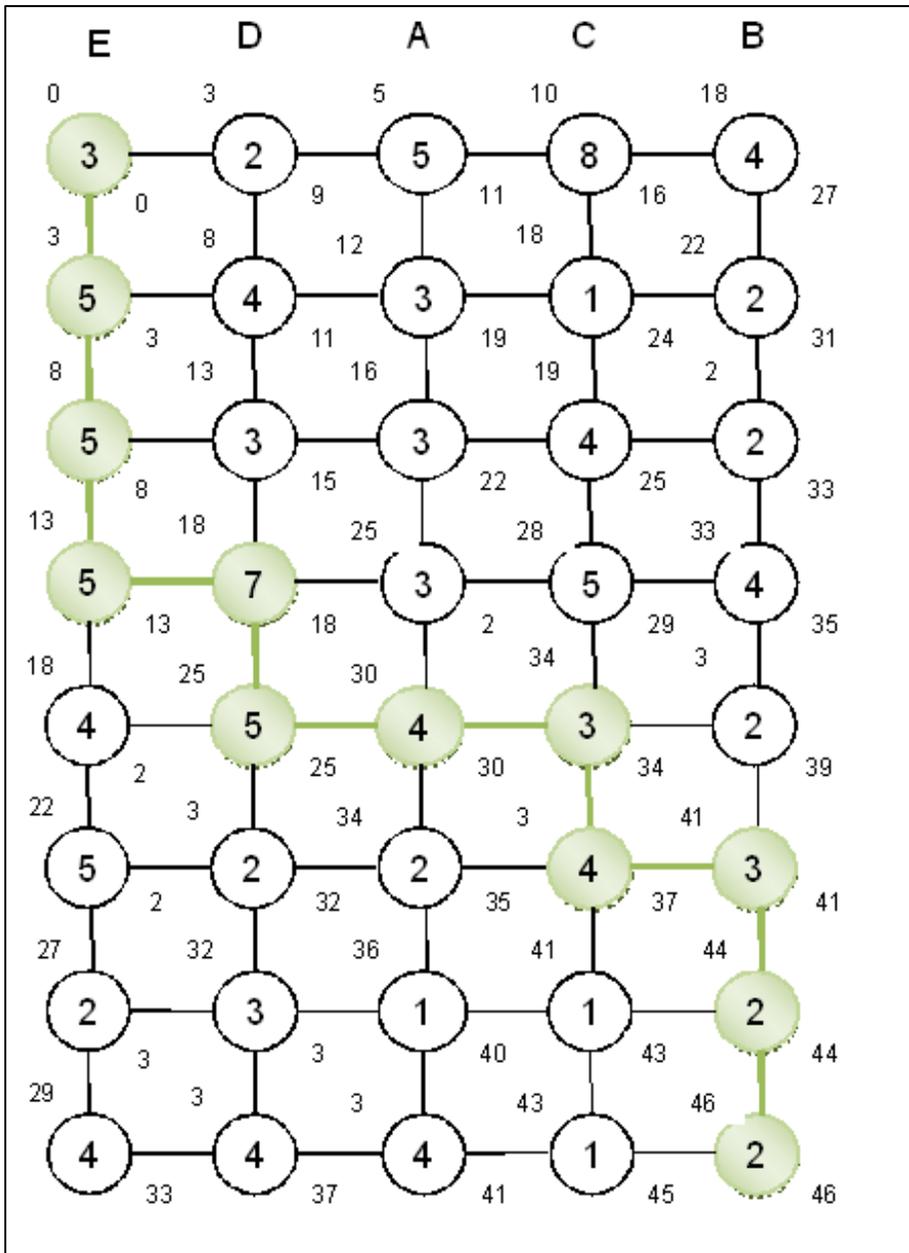
Art. B: 9 h

Art. C: 7 h

Art. D: 6 h

Art. E: 0 h

Figura 4.3. Red para la secuencia EDACB.



4.1.3 Aplicación del Método Tabular

En este método se disponen los n trabajos y las m subdivisiones productivas en una tabla donde la fila representa la carga para cada puesto de trabajo y se establece para cada trabajo su fecha de inicio, terminación y duración en dependencia de la secuencia adoptada.

Esta forma es útil cuando existen varias secuencias y se desea seleccionar cual brinda el menor tiempo de procesamiento, tanto en los programas ordenados como en los no ordenados. Consiste en fijar el inicio en el tiempo 0 para el primer trabajo a ejecutar en la secuencia e ir añadiéndole la forma aritmética más temprana.

Posteriormente se hace la pregunta ¿Qué operación puede hacerse una vez programado éste? Puede hacerse la segunda operación del primer trabajo de la secuencia en el puesto de trabajo correspondiente o la primera operación del segundo trabajo de la secuencia y se procede similarmente al caso de la red.

Al programarse una nueva operación en trabajo de la secuencia dada, es necesario fijarse en la terminación de su operación precedente y la terminación del trabajo anterior a él en el puesto de trabajo en que se va a programar, se selecciona entre estos dos valores, el mayor.

4.1.3.1 Ejemplo

A continuación se muestra la aplicación del método tabular a través de un ejemplo.

Teniendo en cuenta los datos de la tabla 4.4, calcule el TTP por el método tabular para las secuencias ABCED y BACED.

Tabla 4.2. Datos.

Puestos de Trabajo	Artículo y tiempo por lote (horas)				
	A	B	C	D	E
1	3	2	5	8	4
2	5	4	3	1	2
3	5	3	3	4	2
4	5	7	3	5	4
5	4	5	4	3	2
6	5	2	2	4	3
7	2	3	1	1	2
8	4	4	4	1	2

Al realizar el método tabular se muestran los resultados en la tabla 4.3.

Tabla 4.3. Método tabular.

Secuencia	Subdivisión productiva	A			B			C			
		D	I	T	D	I	T	D	I	T	D
A B C E D	1	3	0	3	2	3	5	5	5	10	8
	2	5	3	8	4	8	12	3	12	15	1
	3	5	8	13	3	13	16	3	16	19	4
	4	5	13	18	7	18	25	3	25	28	5
	5	4	18	22	5	25	30	4	30	34	3
	6	5	22	27	2	30	32	2	34	36	4
	7	2	27	29	3	32	35	1	36	37	1
	8	4	29	33	4	35	39	4	39	43	1



Secuencia	Subdivisión productiva	A			B			C			
		D	I	T	D	I	T	D	I	T	D
B A C E D	1	3	2	5	2	0	2	5	5	10	8
	2	5	6	11	4	2	6	3	11	14	1
	3	5	11	16	3	6	9	3	16	19	4
	4	5	16	21	7	9	16	3	21	24	5
	5	4	21	25	5	16	21	4	25	29	3
	6	5	25	30	2	21	23	2	30	32	4
	7	2	30	32	3	23	26	1	32	33	1
	8	4	32	36	4	26	30	4	36	40	1



4.2 Preguntas de autocontrol de temporización.

1. ¿Cuál es el objetivo que se persigue con la temporización dentro del programa de producción?
2. Mencione los métodos más factibles para realizar la temporización.
3. Diga las condiciones que exige cada método para su aplicación.

4.3 Problemas propuestos de secuenciación y temporización.

1.- Los siguientes trabajos están esperando su proceso en el mismo centro de maquinado. Los trabajos se registran a medida que van llegando.

Fecha - Trabajo	Duración de entrega	Días	Costo
A	313	8	100
B	312	16	100
C	325	40	200
D	314	58	50
E	314	3	75

- ¿En qué secuencia deben clasificarse los trabajos de acuerdo con las siguientes reglas de decisión (a) FCFS, (b) EDD, (c) SPT, (d) LPT, (e) TSPT, (f) LS y (g) COVERT? Todas las fechas se especifican como días del calendario de planeación de manufacturas. Suponga que todos los trabajos llegan el día 275. No se permite que ningún trabajo espere más de 50 días.

2.- Los siguientes trabajos están esperando ser procesados en el mismo centro de maquinado:

Trabajo	Fecha de entrega	Duración (horas)	Costo diario
10	260	30	100
20	258	16	100
30	260	8	200
40	270	20	75
50	275	10	100

- ¿En qué secuencia se clasificarían los trabajos de acuerdo con las siguientes reglas de decisión (a) FCFS, (b) EDD, (c) SPT, (d) LPT, (e) TSPT, (f) LS, y (g) COVERT? Todas las fechas se especifican como días de calendario de planeación de manufacturas. Suponga que todos los trabajos llegan en el día 210. No se permite que ningún trabajo espere más de 50 días.

3.- Los siguientes trabajos esperan ser procesados en el mismo centro de maquinado:

Trabajo	Fecha de recepción de la orden	Días de producción necesarios	Fecha de entrega de la orden	Costo del Retraso (\$)
A	110	20	180	500
B	120	30	200	1000
C	122	10	175	300
D	125	16	230	500
E	130	18	210	800

- ¿En qué secuencia se clasificarían los trabajos de acuerdo con las siguientes reglas: (a) FCFS, (b) EDD, (c) SPT, (d) LPT, (e) TSPT, (f) LS, y (g) COVERT?

Todas las fechas corresponden a días calendario del taller. No se permite que ningún trabajo espere más de 70 días. Hoy es el día 130 en el calendario de planeación.

4.- La tabla siguiente contiene información acerca de tareas que se deben programar en una sola máquina.

Tareas	Tiempo de procesamiento (días)	Fecha de vencimiento
A	4	20
B	12	30
C	2	15
D	11	16
E	10	18
F	3	5
G	6	9

- ¿Cuál es el programa de primero en llegar primero en salir (FCFS)?
- ¿Cuál es el programa del tiempo más breve de operaciones (SOT)?
- ¿Cuál es el programa del margen de tiempo restante (STR)?
- ¿Cuál es el programa de la fecha de vencimiento más próximo (DDATE)?
- ¿Cuáles son los tiempos medios del flujo de cada uno de los programas anteriores?

5.- Deben procesarse seis trabajos en una operación de dos pasos. La primera operación involucra la preparación y la segunda es la pintura. Los tiempos de procesamiento son:

Trabajo	Operación 1	Operación 2
	(horas)	(horas)
A	10	5
B	7	4
C	5	7
D	3	8
E	2	6
F	4	3

- Determine una secuencia que minimice el tiempo total de terminación para estos trabajos. Con una gráfica de Gantt, encuentre el tiempo de fabricación.

6.- Considere los siguientes trabajos y sus tiempos de procesamiento en las tres máquinas. No se permite pasar los trabajos.

Trabajo	Máquina 1	Máquina 2	Máquina 3
	(horas)	(horas)	(horas)
A	6	4	7
B	5	2	4
C	9	3	10
D	7	4	5
E	11	5	2

- Con la regla de Johnson, encuentre la secuencia en que deben procesarse los trabajos.

7.- Suponga que en el problema 6 se acaba de agregar una cuarta operación, con tiempos de proceso en la máquina 4 dados como 5, 7, 15, 3 y 4 horas, respectivamente, para los trabajos A a E. Con el algoritmo CDS, encuentre una solución casi óptima. ¿Cuál es el tiempo de fabricación?

8.- A continuación se da una lista de trabajos y su respectiva duración: los trabajos pueden ser procesados por cualquiera de tres máquinas idénticas. Con la regla LPT, haga la secuencia de estos trabajos.

Trabajo	Duración
A	17
B	25
C	50
D	10
E	15
F	9
G	35
H	28
I	5
J	13

9.- La operación requiere que se dé la información de la hoja de ruteo para la terminación de los trabajos A y B.

- Diseñe una gráfica de Gantt para cada centro de maquinado.
- Calcule el porcentaje del tiempo que las máquinas están paradas, antes de la terminación de las operaciones en los centros de trabajo individuales.

Operación número	TRABAJO A		TRABAJO B	
	Centro de trabajo	Tiempo (horas)	Centro de trabajo	Tiempo (horas)
10	2	30	1	40
20	3	30	3	30
30	1	40	2	50

10.- Las operaciones requeridas para completar los trabajos X, Y y Z están dadas por la información de la siguiente hoja de ruteo. Diseñe una gráfica de carga de Gantt para cada centro de maquinado. Suponga dos máquinas en el centro 2.

Operación número	TRABAJO X		TRABAJO Y		TRABAJO Z	
	Centro de trabajo	Tiempo (horas)	Centro de trabajo	Tiempo (horas)	Centro de trabajo	Tiempo (horas)
Orden de liberación		40		40		40
10	2	80	1	60	2	120
20	1	40	2	100	1	160

11.- Siete trabajos deben ser procesados en dos operaciones, la A y la B. Los siete trabajos deben pasar por A y por B en esta secuencia, o sea A antes que B. Determine el orden óptimo de la secuencia en que los trabajos deben ser procesados usando estos tiempos:

TAREAS	TIEMPO PROCESO	TIEMPO PROCESO
	A	B
1	9	6
2	8	5
3	7	7
4	6	3
5	1	2
6	2	6
7	4	7

12.- Las tareas A, B, C, D y E deben pasar por los procesos I y II en esta secuencia (Proceso I primero y después Proceso II). Use la regla de Johnson para determinar la secuencia óptima

del programa de las tareas para reducir al mínimo el total de tiempo requerido.

TAREA	TIEMPO DE PROCESAMIENTO REQUERIDO PARA I	TIEMPO DE PROCESAMIENTO REQUERIDO PARA II
A	4	5
B	16	14
C	8	7
D	12	11
E	3	9

13.- Con la regla de Johnson, programe los siguientes seis trabajos en dos máquinas, en la secuencia que reduzca al mínimo el tiempo de flujo.

TAREA	TIEMPO DE OPERACIONES	
	MÁQUINA 1	MÁQUINA 2
A	5	2
B	16	15
C	1	9
D	13	11
E	17	3
F	18	7

14.- Se tienen dos máquinas y siete trabajos, que hay que procesar primero en M1 y luego en M2. Si los tiempos de proceso son:

Máquinas	J1	J2	J3	J4	J5	J6	J7
M1	7	14	25	3	12	6	4
M2	10	14	16	10	7	5	4

- Calcular la secuenciación más adecuada con el objetivo de que se finalice lo más pronto posible todos los trabajos.

15.- Se deben procesar ocho trabajos a través de las máquinas 1 y 2, también se cuenta con el tiempo de procesamiento para cada trabajo:

Máquinas/Trabajos	A	B	C	D	E	F	G	H
1	8	10	14	5	9	13	20	26
2	13	11	7	5	28	20	14	4

- ¿Qué secuencia se debe utilizar para minimizar el período del proceso?
- Elabore una gráfica de Gantt para determinar el TTP requerido.

16.- Se deben procesar ocho trabajos a través de la máquina A y B, también se cuenta con el tiempo de procesamiento para cada trabajo:

Trabajos	Máquinas/minutos	
	A	B
T-1	15	11
T-2	11	17
T-3	12	12
T-4	13	9
T-5	8	14
T-6	11	13
T-7	10	6
T-8	6	12

- ¿Qué secuencia se debe utilizar para minimizar el período del proceso?
- Elabore una gráfica de Gantt para determinar el TTP requerido.

17.- El taller de la Empresa Comercializadora de Combustible Matanzas (ECCM), tiene en plan para el primer trimestre del año, fabricar cinco pedidos diferentes que tienen la misma tecnología, los cuales deben pasar por ocho puestos de trabajo.

El programador decidió que para facilitar el control y asignación de recursos a la producción, esta se fabricaría en un solo lote cada pedido y que ningún artículo puede pasar de un puesto de trabajo a otro hasta que el lote completo no estuviera en el puesto de trabajo anterior.

El régimen del taller es de 24 días en jornadas de 8 horas y los tiempos de procesamiento de un lote de cada pedido en los puestos de trabajo se muestran al final del ejercicio.

Determine:

- ¿Cuál sería el orden de fabricación de los cinco artículos que minimice su tiempo total de procesamiento?
- Calcule el tiempo límite de procesamiento total.
- Calcule el TTP para las secuencias calculadas.

Puesto de Trabajo(días)	Tiempo de procesamiento de un lote en cada pedido					Carga
	A	B	C	D	E	
P-1	5	4	8	2	3	22
P-2	3	2	1	4	5	15
P-3	3	2	4	3	5	17
P-4	3	4	5	7	5	24
P-5	4	2	3	5	4	18
P-6	2	3	4	2	5	16
P-7	1	2	1	3	2	9
P-8	4	2	1	4	4	15
Total	25	21	27	30	40	
Fecha de entrega	30	15	30	45	40	

18.- Un taller de artesanía le suministra varios artículos al Fondo Cubano de Bienes Culturales (FCBC). Estos artículos son (collares, pulsos y aretes), siendo el metal la materia prima fundamental utilizada, para trabajar la línea de la orfebrería. La tecnología de fabricación de los artículos es similar, siendo el desplazamiento entre los puestos de trabajo de los artículos de forma consecutiva.

Se conoce además los tiempos de procesamiento para cada lote de artículo en cada puesto de trabajo como lo muestra la tabla:

Se desea que usted: Pruebe que se cumplan las restricciones del método.

De cumplirse:

- Determine el tiempo límite de procesamiento.

- Encuentre un orden de fabricación de los artículos que haga mínimo el tiempo total de procesamiento.
- Calcule el tiempo total de procesamiento para la (las) secuencia (s) obtenidas.

Puestos	Tiempo de procesamiento (h/lote)				
	A	B	C	D	E
X	5	6	3	2	4
Y	4	5	4	7	6
Z	6	4	5	6	4

BIBLIOGRAFÍA

1. Ackoff Buisell, C. (1977): Fundamento de investigación de operaciones. Editorial Limusa, México.
2. Adam, E. & Ebert, R. (1991): Administración de la producción y de las operaciones, cuarta edición, Ed. Prentice Hall, México D.F.
3. Bera, H. (1996): Computer aided scheduling (CAS) and manufacturing. Segundo seminario sobre sistemas avanzados de manufactura, Pereira.
4. Buffa, E. & Sarin, R. (1995): Administración de la producción y de las operaciones. Ed. Limusa, México D.F.
5. Chase, R. & Aquilano, N. (2000): Dirección y administración de la producción y de las operaciones, 6ª. Ed., Editorial Irwin, Barcelona.
6. Chase, R. & Aquilano, N. (2007): Administración de la producción y operaciones. Capítulo 16, p. 690 – 717. Editorial Mc Graw Hill, México, D.F.
7. Colectivo de Autores. (2007): Tabloide para la maestría en ciencias de la educación. Editorial Pueblo y Educación, Ciudad Habana, Cuba.
8. Companys Pascual, R. (1989): Planificación y programación de la producción, Ed. Marcombo S.A., Barcelona, España.
9. Company Pascual, R. y Corominas Subias, A. (1994): Organización de la producción I. Diseño de sistemas productivos. Editorial UPC.
10. Díaz, A. (1993): Producción, gestión y control, Editorial Ariel, S.A. Barcelona. España.
11. Domínguez Machuca, J.A. et al. (1995): Dirección de operaciones. Aspectos tácticos y operativos en la producción y los servicios. Editorial Mc Graw Hill, Madrid.
12. Escalona, I (s/a): Planeación y control de la producción,

- en <http://www.gestiopolis.com>. (Consultada 18 de enero del 2010).
13. Everett, E & Eblet, R. (1989): Administración de la producción y las operaciones. Conceptos, modelos y funcionamientos, Editorial Prentice Hall-Hispanoamericana, S.A., México.
 14. Fundora Miranda, A. (1987): Organización y planificación de la producción II. Editora ISPJAE, Ciudad de La Habana, Cuba.
 15. Hernández Pérez, G. (1986): Fundamentos de la proyección de fábricas de construcción de maquinarias. Editora Pueblo y Educación, Ciudad Habana, Cuba.
 16. <http://www.monografias.com/trabajos12/igmanalis/igmanalis.shtml>. Ingeniería de métodos. Análisis sistemático de la producción, (Consultada 20 de enero del 2010).
 17. <http://www.monografias.com/trabajos13/upicsa/upicsa.shtml>. Investigación de operaciones-programación lineal, (Consultada el 25 de marzo del 2010).
 18. <http://www.monografias.com/trabajos13/placo/placo.shtml>.
 19. Planeación y control de la producción (PCP-UPIICSA), (Consultada el 22 de abril del 2010).
 20. <http://www.elprisma.com>. Planificación, programación y control de la producción, (Consultada el 23 de abril del 2010).
 21. Krajewski & Ritzman (2008): Administración de operaciones. Editorial Mc Graw Hill, 8va Edición, México.
 22. Maynard, Manual de ingeniería y organización, (S/L, S/N, S/A).
 23. Medina León, A. et al. (1997): Folleto de actividades prácticas. OPCP III. Imprenta Universidad Matanzas. Cuba.
 24. Medina León, A. et al. (2009): Modificación al método

- de los índices. Revista: Ingeniería Industrial, Vol 30, No 1. CUJAE, Ciudad de La Habana, Cuba.
25. Meredith, J. & Gibbs, T. (1986): Administración de Operaciones, Ed. Limusa, México D.F.
 26. Nahmias, S. (1997): Production and operations analysis. Third edition, Ed. Irwin, Chicago.
 27. Narasimhan, S. et al. (1996): Planeación de la producción y control de inventarios, Editorial. Prentice Hall, México.
 28. Russell, R. & Taylor, B. (1998): Operations management. Focusing on quality and competitiveness. Second edition, Ed Prentice Hall, New Jersey.
 29. Sánchez Lara, A. (1974): Planificación y Control de la producción. Instituto Cubano del Libro, Cuba.
 30. Sarache Castro, A (s/a): El proceso de planificación, programación y control de la producción. Una aproximación teórica y conceptual, en <http://www.monografías.com>. (Consultada el 26 de abril del 2010).
 31. Sasieni, Y. (1970): Investigación de operaciones. Métodos y problemas. Editorial Ciencia y Técnica, Instituto del Libro, La Habana. Cuba.
 32. Schroeder, R. et al. (2011): Administración de operaciones, toma de decisiones en la función de operaciones, 8ª. Ed, Editorial Mc Graw Hill, México.
 33. Starr, M. (1979): Administración de la producción. Sistemas y síntesis, Ed. Dossat S.A., Madrid.
 34. Tawfik, L. & Chauvel, A.M. (1992): Administración de la producción, Ed. Mc Graw Hill, México D.F.
 35. Vollmann T. et al. (1991): Sistema de planificación y control de la fabricación. Editorial Tecnología de Gerencia y Producción, S.A. España.

Otros autores asociados a los capítulos

Daylin Medina Nogueira

- Máster en Gestión de la Producción y los Servicios en la Universidad de Matanzas (2014).
- Ingeniera Industrial (2013).
- Responsable del proyecto "Impacto de la Gestión del Conocimiento en el desarrollo local".
- Coordinadora de la Cátedra de Gestión por el Conocimiento "Lázaro Quintana Tápanes".
- Profesora del departamento de Ingeniería Industrial de la UMCC.

Arturo Bofill Placeres

- Ingeniero Industrial en la Universidad de la Habana (1970).
- PhD en Ciencias Económicas en Praga (1985).
- Coautor de los libros de: Metodología de la Investigación para Ciencias Empresariales (2004).
- Probabilidades (2005) y Optimización de Sistemas (1985).
- Profesor Titular de la UMCC.

Ariadna García Romero.

- Ingeniera Industrial. Graduada en la Universidad de Matanzas en el 2010.
- Como estudiante desarrolló investigaciones y su trabajo de diploma asociado al tema de la presente obra.
- Actualmente labora en una empresa de servicio del municipio de Matanzas.

Annaray Paz Márquez.

- Ingeniera Industrial de la UMCC (2012).
- Profesora del Departamento de Estadística y cursa el programa de Maestría en Administración de Empresas.

Lixandra Alonso Gámez.

- Asistente Técnico Docente de la disciplina Gestión de la Producción en el departamento de Ingeniería Industrial.
- Estudiante de Ingeniería Industrial en su último año y trabajadora de Servicios Académicos de la Universidad de Matanzas "Camilo Cienfuegos".

Dinora Carpio Vera.

- Magister en Docencia y Currículo (2013).
- Ingeniera en Sistemas (2005).
- Profesora de la Facultad de Ciencias Jurídica, Sociales y de la Educación (2005), Universidad Técnica de Babahoyo.
- Ponente en eventos científicos en la UMCC (2012).

Josué Oviedo Rodríguez

- Licenciado en Comercio y Administración (1992).
- Ingeniero Industrial (1991).
- Magister en Desarrollo Educativo (2000).
- Profesor de Facultad de Ciencias Jurídica, Sociales y de la Educación
- Cursa el Doctorado en Ciencias Pedagógicas en la UMCC.

LA PRESENTE OBRA

Está creada como material auxiliar a la enseñanza de la temática de Programación de la Producción. Por su estructura, y la cantidad de temas que aborda, contribuye tanto a la enseñanza de pregrado como de postgrado.

Su principal contribución está en la compilación, en único material, de un amplio número de técnicas, herramientas y métodos que estudian esta función de la Administración de Operaciones, con ejemplos didácticos y probados en la enseñanza durante más de 10 años.

Para su elaboración se consultó y aprovechó la experiencia de los principales clásicos de esta rama del saber, empleados en la enseñanza durante la última década.

En la función de asignación, se incorpora el método de los índices, como novedad en el material; así como otros métodos que, aunque se emplean en otras disciplinas, se incluyen para brindar un abordaje completo al tema, tales como: método de transporte y el método húngaro.

Los autores.

Auspician:



ISBN 978-9942-9936-3-2



9 789942 993632