INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS SUPERIORES DE MONTERREY
CAMPUS ESTADO DE MÉXICO

MODELACIÓN DE UN TALLER DE MANTENIMIENTO DE MOLDES DE INYECCIÓN

TESIS QUE PARA OPTAR EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS EN SISTEMAS DE MANUFACTURA
PRESENTA

MANUEL SALVADOR VEGA LEÓN

Asesor: Dr. DANTE JORGE DORANTES GONZÁLEZ

Comité de tesis: M. en C. GUILLERMO ROBERTO HAAZ DÍAZ
M. en C. MANUEL ALVAREZ MADRIGAL

Jurado:
M. en C. GUILLERMO ROBERTO HAAZ DÍAZ, Presidente
M. en C. MANUEL ALVAREZ MADRIGAL, Secretario
Dr. DANTE JORGE DORANTES GONZÁLEZ, Vocal

Atizapán de Zaragoza, Edo. Méx., Agosto de 2004.

RECONOCIMIENTOS.

Este trabajo es resultado del apoyo recibido por el CONACYT y el ITESM. Ambas instituciones son una plataforma nacional para el desarrollo tecnológico y fundamento de la educación de calidad mundial en México.

RESUMEN.

La modelación es uno de los métodos utilizados para definir, entender y representar un sistema. En su aplicación es necesario realizar un análisis profundo para tener una visión que permita aproximar el modelo lo más posible a la realidad.

El trabajo presenta la información general de la empresa, cuales son sus objetivos y metas, y cual es el lugar que ocupa el taller de mantenimiento de moldes de inyección en ella. Ubica el ambiente en el que se desarrolla el análisis y permite localizar el medio en el que se encuentra el sistema. Muestra la forma en que se estructuraron las bases del análisis y se llego a las representaciones gráficas en las que se consideran las variables que tienen mayor influencia.

Se proporcionan los datos relacionados con el estado de la industria manufacturera en México, así como la realidad que vive esta rama económica del país. También se presentan las cifras e información que sirven para ubicar la importancia que tienen los trabajos que busquen optimizar alguna etapa de cualquier proceso productivo.

Se hace el planteamiento del problema indicando la propuesta y los objetivos. Se plantea la metodología de solución y los principios a considerar para el modelado básico. Se incluye, como referencia, el tema más próximo a lo que se refiere un análisis del tipo taller de mantenimiento (toolshop) localizado en las bases de información: la relajación lagrangiana.

Con las bases anteriores se pasa al desarrollo del modelo y se presenta la forma en la que se estructuro cada una de las etapas señaladas en el capítulo anterior. Los tres pasos del desarrollo para la modelación: el análisis, la caracterización y clasificación, y la estructuración se muestran con las consideraciones particulares de cada etapa.

Las conclusiones se presentan en el penúltimo capítulo, y es con ellas que se busca aportar en la materia y establecer base para trabajos posteriores. Finalmente, el trabajo cierra con las conclusiones en el último capítulo.

LISTA DE FIGURAS Y TABLAS.

Fig. 1.- Productos representativos y máquina Krauss Maffei para inyectar 4 colores. 8
Fig. 2.- Algunas áreas y equipo del taller de mantenimiento. 10
Fig. 3.- Mapa del sistema "taller de mantenimiento de moldes de inyección de plástico". 29
Fig. 4.- Un ejemplo de Plan de Proceso. 31
Fig. 5.- Orden de trabajo para el trabajo *i*. 36
Fig. 6.- Un trabajo programado. 36
Fig. 7.- Un esquema del algoritmo. 46
Fig. 8.- Arreglo físico del sistema. 57
Fig. 9.- Organización de los horarios del personal del taller. 60
Fig. 10.- Cantidad de mantenimientos correctivos y preventivos. 62
Fig. 11.- Componentes del código de identificación de fallas. 63
Fig. 12.- Componentes y sus fallas. 64
Fig. 13.- Formato para establecer la relación entre variables. 65
Fig. 14.- Formato básico para establecer la relación existente entre las variables del sistema. 66
Fig. 15.- Ejemplo. Falla 1 1 36 08. 67
Fig. 16.- Base de la estructuración. 68
Fig. 17.- Esquematizado de la falla. 69
Fig. 18.- Patrón base de codificación. 70
Fig. 19.- Patrón base de codificación considerando las variables "prioridad" y "habilidad". 83

Tabla 1.- Identificación de la rama de la Industria Automotriz 15
Tabla 2.- Condensado del libro de Actividades de Producción y Bienes. Censo económico 1999. Minería y extracción de petróleo. Manufacturas. Electricidad. Captación, tratamiento y suministro de agua. INEGI. 7
Tabla 3.- Condensado del cuaderno de información oportuna 2004. Primera edición. 344 pp. INEGI. 18
Tabla 4.- Volumen físico de la producción por actividad económica. 19
Tabla 5.- Comportamiento del Índice de Volumen Físico de la producción manufacturera. 19
Tabla 6.- Empleo y salario. Índice de personal ocupado en la industria manufacturera. Variación porcentual. 20
Tabla 7.- Gráfica: Relación de la cantidad de personal operativo vs. número de moldes. 21
Tabla 8.- Datos para el ejemplo 1. 47
Tabla 9.- Diagrama de Gantt del programa para el ejemplo 1. 47
Tabla 10.- Generación del programa y reconfiguración para máquinas de NC. 49
Tabla 11.- Datos para máquinas NC / programa de mayo 3, 1991. 50
Tabla 12.- Estaciones de trabajo del sistema. 53
Tabla 13.- Entidades de una estación de trabajo. 55
Tabla 14.- Caracterización de la maquinaria (datos a considerar). 57
Tabla 15.- Puestos y niveles del personal operativo. 59
Tabla 16.- Caracterización del personal operativo. 61
Tabla 17.- Grupo de fallas esquematizadas para diferentes moldes. 71
Tabla 18.- Tabla de prioridades. 74
Tabla 19.- Escenarios de prioridades (del 1 al 5) 78
Tabla 20.- Grupo de fallas considerando la prioridad del trabajo y la habilidad de los operadores. 84
Tabla 21.- Grupo de fallas ordenadas según su prioridad y el escenario bajo el que se desarrolla el trabajo. 89
Tabla 22.- Nueva asignación de recursos según el cambio de escenario. 90

Contenido

Reconocimientos. 2

Resumen. 3

Lista de figuras y tablas. 4

1. Introducción.
1.1 Presentación de la empresa. 8
1.2 El taller de mantenimiento de moldes de inyección. 9

2. Antecedentes. 12
2.1 La industria manufacturera en México. 13
2.2 Situación actual y perspectivas futuras. 14
2.3 Registros y estadísticas. 17

3. Modelos de taller de mantenimiento.
3.1 Planteamiento del problema. Justificación. 21
3.1.1 Propuesta. 22
3.1.2 Objetivos. 23
3.2 Metodología de solución del problema. 23
3.2.1 Principios a considerar. 24
3.2.2 Modelado del sistema. 26
3.2.3 Consideraciones para el caso del taller de mantenimiento de moldes de inyección. 28
3.3. Ejemplo de resolución a problemas de programación del taller (la relajación lagrangiana). 30
3.3.1 Formulación del problema. 34
3.3.2 Metodología de solución. 37
3.3.3 Evaluación de funcionamiento. 44

4. Desarrollo del modelo.
4.1 Análisis. 52
4.1.1 Identificación de las funciones del taller de mantenimiento de moldes de inyección. 52
4.1.2 Estaciones de trabajo y entidades. 53
4.1.3 Distribución física del taller de mantenimiento. 56

4.2 Caracterización y clasificación.
4.2.1 Caracterización de la maquinaria. 56
4.2.2 Caracterización del personal operativo. 58
4.2.3 Caracterización de las actividades principales del taller. 62
4.2.4 Relación entre las estaciones de trabajo y las actividades a desarrollar. 65
4.3 Estructuración.
4.3.1 Establecimiento de un sistema de codificación para la identificación rápida de la actividad y la estación de trabajo. 67
4.3.2 Esquematizado de la falla. 69
4.3.3 Patrón base de codificación. 72
4.3.4 Consideración de la variable "Prioridad". 72
4.3.5 Escenarios de trabajo. 75
4.3.6 Consideración de la variable "Habilidad". 83
4.3.7 La variable "Tiempo". 86
4.3.8 Caso de aplicación de los diferentes escenarios de trabajo. 88
4.3.9 Trabajos posteriores 92

5. Conclusiones. **93**

6. Bibliografía. **96**

1. INTRODUCCIÓN.

1.1. PRESENTACIÓN DE LA EMPRESA.

La empresa, es una compañía dedicada a la fabricación de partes para la iluminación automotriz. Su visión es llegar a ser el líder en iluminación automotriz en el continente americano.

Cuenta con 1,300 personas organizadas en tres diferentes unidades de producción y seis áreas de servicio que se enfocan a optimizar sus propios indicadores y presentar resultados de forma individual concentrando así la atención en sus áreas específicas.

Fig. 1.- Productos representativos y máquina Krauss Maffei para inyectar 4 colores.

El 60 % de la producción está destinada a mercados extranjeros. El destino principal está en las armadoras de Estados Unidos. Sus clientes principales son:

- Volkswagen
- Mercedes Benz
- Daymler Chrysler
- BMW
- NISSAN
- General Motors

Es una empresa que cuenta con diferentes certificaciones obtenidas por la organización de sus sistemas administrativos y de producción.

Actualmente se encuentra realizando un esfuerzo conjunto para alcanzar reconocimientos relacionados con el logro de certificaciones ambientales, con objetivos y metas que cumplen con la reglamentación vigente y reforzando aspectos de seguridad, orden y limpieza.

El crecimiento de los últimos dos años ha generado una ola de tecnificación y preparación sin precedentes en el grupo. Cuenta con tecnología de la más avanzada dentro de sus áreas productivas:

Procesos de inyección de termoplásticos de partes de hasta cuatro colores diferentes.
Inyección de partes de plástico que forman parte de las ópticas de faros y calaveras que cumplen con especificaciones gubernamentales de Estados Unidos y Europa.
Procesos de soladura por ultrasonido para garantizar la unión de partes y hermeticidad de los faros y las calaveras.
Procesos de laqueado y metalizado que cumplen con las exigencias cosméticas de los clientes.

- Un área de desarrollo técnico que está soportada por toda la experiencia de la planta matriz en Alemania.
- Procesos de inyección de termofijos.

En general, es una empresa que presenta una dinámica intensa y que, como lo indica y divulga en su misión, busca ser el líder en su ramo en el continente americano.

1.2. EL TALLER DE MANTENIMIENTO DE MOLDES DE INYECCIÓN.

El taller de mantenimiento de moldes de inyección, departamento de servicio dentro de la empresa, es el lugar en donde se realizan los mantenimientos preventivos y correctivos a los herramentales con los que se trabaja, principalmente moldes de inyección de plástico. Utilizando diferentes procesos de manufactura (fresado, rectificado, erosión, etc.) se fabrican las refacciones necesarias para cumplir con el objetivo principal del departamento: mantener trabajando las máquinas de inyección de plástico que hay en la empresa y cubrir la demanda de apoyo que solicitan todas las áreas de transformación.

El taller de mantenimiento de moldes de inyección ocupa un área de 760 m^2 . En este espacio están coordinados 34 técnicos especializados que son los que conforman el equipo de trabajo.

Cuenta con todas las herramientas necesarias para cumplir con las exigencias de calidad que demandan tanto los clientes internos como los externos:

- Herramientas de diseño en tres dimensiones.
- Centro de máquinado de cinco ejes para la fabricación de electrodos y partes complejas.
- Máquinas electro-erosionadoras de penetración y de hilo.
- Prensas de sellado (spotting press) de 40 y de 200 toneladas.
  Rectificadoras de superficies planas y cilíndricas.
  Tornos convencionales.
  Un departamento de metrología que cuenta con una máquina de medición por coordenadas y equipo de digitalizado.
  Software para el desarrollo de programas CAM.

Fig. 2.- Algunas áreas y equipo del taller de mantenimiento.

El servicio del taller de mantenimiento de moldes de inyección está supeditado a las exigencias que presentan las áreas operativas, dicho mantenimiento se ofrece durante las 24 horas todos los días laborables del año; sin embargo, por la naturaleza misma del trabajo y la demanda operativa que se ha presentado en los últimos tiempos el taller se ha visto en la necesidad de operar los 365 días del año durante los tres turnos de cada día.

Una de las ventajas que presenta el taller es que la rotación de personal se puede considerar prácticamente de cero. Existen trabajadores que tienen hasta 30 años laborando dentro del grupo. La capacitación es constante y los técnicos que se han incorporado a últimas fechas lo han hecho debido a cambios estructurales que buscan incrementar la eficiencia y flexibilidad del área.

Conocer la diferencia que existe entre ser eficiente y ser eficaz, en un departamento de este tipo, es parte fundamental de la filosofía que se aplica en las vivencias que se dan al resolver los problemas de cada día. La meta es incrementar siempre los índices de eficiencia en todas las labores por simples que éstas sean.

Existen varios indicadores que sirven como guías para conocer el nivel de eficiencia del área:

- Tiempo extra laborado por el personal.
- Cantidad de Ordenes de Trabajo realizadas al mes.
- Porcentaje de rechazo generado por las áreas productivas y cargado al departamento debido a fallas provocadas por algún trabajo de reparación.
- Número de mantenimientos preventivos realizados al mes.
- Número de mantenimientos correctivos realizados al mes.
- Cantidad de Reportes de Acción Correctiva enviadas al departamento debido a la responsabilidad de falla generada por alguna reparación.
- Número de accidentes registrados al mes.

Estos indicadores se revisan semanalmente por el equipo de trabajo del taller y se reportan mensualmente a la Gerencia General quien en conjunto con el equipo se encarga de buscar y hacer propuestas de mejora continua que permitan asegurar el nivel actual y mantener el ritmo de crecimiento con la calidad y eficiencia requeridas.

2. ANTECEDENTES.

En estos tiempos en los que se da especial énfasis a los temas de optimización y de incremento de la eficiencia de los procesos productivos, es necesario buscar nuevas formas de trabajo que permitan llegar a las metas trazadas y lograr los objetivos establecidos.

Desde los años ochenta la economía mexicana enfrenta un periodo de cambio estructural que afecta particularmente a la industria manufacturera. El predominio de una concepción teórica neoliberal, que se propone limitar la acción reguladora del estado y confiar en la operación de los mercados para una eficiente asignación de los recursos productivos, permitió la aplicación de medidas que en un máximo de 20 años transformaron significativamente la participación del estado mexicano en la economía.

La reflexión sobre el estado de la industria manufacturera en México permite ubicar la importancia que tiene cualquier trabajo que busque optimizar alguna tarea del ámbito productivo, sin importar el área de la que se trate.

Durante los primeros seis meses de 2003, el valor real del PIB creció a una tasa anual de 1.2%. La actividad de la economía en México se mostró débil, principalmente debido al comportamiento en la rama manufacturera (sólo hasta noviembre de 2003 habían cerrado más de 1,200 empresas del ramo textil, cayendo 7.9% su crecimiento anual).

Este trabajo se ocupa de los talleres mecánicos que producen y/o mantienen los herramentales básicos o auxiliares de la producción industrial. Estos talleres representan un porcentaje mínimo dentro de todo el universo de la industria manufacturera pero su importancia radica en que son parte del soporte de los procesos productivos de la industria nacional.

La programación es uno de los temas importantes en la planeación y operación de los sistemas de manufactura. La generación de programas consistentes y buenos ha probado ser extremadamente difícil. Para los talleres de mantenimiento el problema es que las soluciones óptimas de programación involucran procedimientos de numeración costosos e imprácticos, mientras que el funcionamiento de la mayoría de las técnicas heurísticas es difícil de estimar y varía considerablemente de un problema a otro.

2.1 LA INDUSTRIA MANUFACTURERA EN MÉXICO.

Una de las áreas de la economía mexicana que se ha desarrollado en los últimos años con más fuerza, es la de la industria manufacturera. Las cifras indican que se ha realizado un vuelco completo al pasar de una economía proteccionista y dependiente del petróleo a una economía abierta que se ha enfrentado a la globalización y que muestra una distribución más balanceada en los sectores que la componen.

Analizar el estado que tiene actualmente la industria manufacturera en México, implica hablar del crecimiento económico, del papel de las exportaciones, de la industria y el empleo existentes en el país, llegando al proceso globalizador en el que se encuentra inmerso hoy en día. La Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE) define a la globalización como un proceso por el cual los mercados económicos, *las tecnologías* y los sistemas de comunicación *gradualmente adquieren más características globales en detrimento de las nacionales o locales.*

De los últimos 150 años de historia económica del mundo[1], el período 1950-1973 se considera la época de oro de la prosperidad. En México, la época de oro de su economía fue más prolongada, pues se inició en 1939 y terminó en 1981. Durante esos años el crecimiento del PIB fue cuatro veces mayor que el de la población. El ritmo de crecimiento de la economía mexicana fue particularmente dinámico durante los últimos cinco años de su época dorada.

Aun cuando la de México ya se ubicaba entre las economías más exitosas de América Latina, a fines de los años setenta aceleró más su desarrollo con una ambiciosa estrategia de industrialización financiada por las exportaciones petroleras y los préstamos externos. Hacia 1979-1980 el PIB creció a tasas anuales cercanas a 9% en términos reales. Este acelerado avance tenía lugar al tiempo que la inflación se mantenía relativamente estable y los déficit fiscal y de comercio exterior eran moderados.

---

[1] *A. Madison, Monitoring the World Economy: 1820*

En 1982, la exagerada expansión del gasto público, apoyada en préstamos externos a corto plazo, el debilitamiento del precio del petróleo de exportación, el alza de las tasas de interés en los mercados financieros mundiales y la drástica interrupción del acceso al capital extranjero se combinaron para detonar una aguda crisis fiscal y de balanza de pagos.

México, de ser un país preponderantemente exportador de materias primas, ha buscado desarrollar otras industrias, las cuales permiten competir con las mejores ventajas competitivas posibles con el resto de las economías mundiales. Ya desde fines de los setenta, los profundos cambios en los mercados, propiciados por la dinámica de las telecomunicaciones y las tecnologías de la información anunciaban un proceso como el que hoy se vive.

México en la década pasada conoció el crecimiento más alto de sus exportaciones[2]: 15% por año, por arriba de China, Malasia, Taiwán y Singapur.

En 1994, las exportaciones mexicanas hacia el mercado estadounidense ascendieron a 51.64 billones de dólares, para alcanzar en 1999 la cifra de 120.6 billones de dólares. Durante este periodo, México presentó déficit comercial sólo en 1994 de 3 mil 145 millones de dólares, pero después ha presentado constantes superávits comerciales llegando en 1999 a la cifra de 15 mil 253 millones de dólares.

2.2 SITUACIÓN ACTUAL Y PERSPECTIVAS FUTURAS.

Para ubicar a la industria manufacturera dentro del ámbito económico del país, el INEGI ha establecido información que se presenta con diferentes niveles de agregación a través del sistema de Clasificación de Actividades Económicas. La Clasificación Mexicana de Actividades y Productos (CMAP) contempla distintos niveles que se identifican por sector, subsector, rama y clase de actividad. Es aquí donde la industria manufacturera ocupa el sector número tres dentro de la clasificación general.

La forma de identificar la actividad de fabricación de partes y accesorios para automóviles y camiones se realiza como se presenta a continuación: cae dentro del subsector número 38 que corresponde al área identificada como "Productos Metálicos, Maquinaria y Equipo. Incluye Instrumentos Quirúrgicos y de Precisión". La rama correspondiente es la 3841 y se refiere a la rama identificada como "Industria Automotriz". Finalmente, la clase particular en la que queda comprendida la empresa es la 384126 "Fabricación de Otras Partes y Accesorios para Automóviles y Camiones".

---

[2]Lic. Noé Paz Cruz (Economista). Réplica y comentarios al autor: noepaz_cruz@hotmail.com y npaz@finanzas.df.gob.mx

Tabla 1.- Identificación de la rama de la Industria Automotriz.[3]

NIVEL	*CÓDIGO CMAP*	*DESCRIPCIÓN*
SECTOR	3	INDUSTRIAS MANUFACTURERAS
SUBSECTOR	38	PRODUCTOS METÁLICOS, MAQUINARIA Y EQUIPO. INCLUYE INSTRUMENTOS QUIRÚRGICOS Y DE PRECISIÓN.
RAMA	3841	INDUSTRIA AUTOMOTRIZ
CLASE	384126	FABRICACIÓN DE OTRAS PARTES Y ACCESORIOS PARA AUTOMÓVILES Y CAMIONES.

De esta manera se puede dar seguimiento particular al desarrollo de la clase con el paso del tiempo. En la información que presenta el INEGI relacionada con el Censo Económico de 1999 se observa que en aquel tiempo existían 493 Unidades Económicas (empresas) enmarcadas en la clase 384126, en todo el país. Estas empresas tenían 52,445 personas empleadas

Los 4 mil 157 millones de dólares de Inversión Extranjera Directa (IED) captados por México para enero-junio de 2003 (3,164.4 md de movimientos de inversión y materializados durante ese periodo, y 995.4 md de importaciones de activo fijo por parte de empresas maquiladoras) se canalizaron a la industria manufacturera[4] que recibió el 54%; al sector de servicios financieros el 20.5%; al comercio el 12.8%; a transportes y comunicaciones el 5.5%; y a otros sectores el 7.2%. Del total de esta IED, destacan los 3,129.7 md (75.3%) que provinieron de Estados Unidos, que incluyen 995.4 md en importaciones de activo fijo, representando el 94.2 por ciento del total en este rubro. Dentro de la industria manufacturera, el subsector de "Productos metálicos, maquinaria y equipo" captó el 27.5% de la inversión notificada al registro nacional de inversiones extranjeras, mientras que sus importaciones de activo fijo realizadas por maquiladoras alcanzaron el 67.7 por ciento del total.

El grueso de las exportaciones se dirige a Estados Unidos y de este país procede una gran parte de las importaciones (90%). En años recientes el cambio más notable fue la mayor participación de las exportaciones nacionales en las importaciones totales de Estados Unidos, de suerte que México se transformó a fines de la década pasada en el tercer proveedor más importante del mercado estadounidense, sólo después de Canadá y Japón. Por razones de competitividad, ya desde el 2003 China ha logrado superar a México en este tercer lugar.

Entre las exportaciones mexicanas a Estados Unidos que más han crecido en los últimos años destacan las de automóviles y auto-partes. En lo que toca a los vehículos automotores para pasajeros, los envíos cobraron importancia desde principios de los noventa. De 1989 a 1997 la producción de ellos se duplicó y las exportaciones casi se cuadruplicaron, dirigiéndose el 90% de las exportaciones de la industria de automotores al mercado estadounidense.

---

[3] Manual Actividades de Producción de Bienes. Censos Económicos 1999. Minería y Extracción de Petróleo. Manufacturas. Electricidad. Captación, Tratamiento y Suministro de Agua. INEGI. p.p. 4, 22, 32, 35.

[4] por Jorge Mendoza. Réplica y comentarios al autor: jjordian@yahoo.com

Las primeras empresas que han canalizado inversiones para establecer una plataforma exportadora desde México hacia el resto de América del Norte son las estadounidenses, destacando en la industria de automotores tres empresas: Chrysler, Ford y General Motors.

En las últimas décadas han surgido nuevas teorías de crecimiento, estos estudios han dado un nuevo punto de vista a lo que se conoce como las fuentes de crecimiento y *han dado lugar central al análisis sobre el papel de las innovaciones tecnológicas y su difusión.*

En la división de maquinaria y equipo, que aporta un cuarto de la producción manufacturera total, el resultado a octubre del año pasado es un aumento de 0.3 por ciento, que si bien resulta modesto, contrasta con la caída de los tres trimestres previos.

La industria manufacturera muestra ya señales de mejoría, aunque no de manera generalizada, y aunque las tasas de crecimiento de este sector podrían moderarse en los meses siguientes, se pronostica que seguirán un proceso de recuperación más gradual.

Uno de los beneficios que han surgido a raíz de la entrada del tratado de libre comercio -desde 1994- con EU y Canadá es que *la productividad en la industria creció 47.7% de 1994 a 2001.*

Los puntos en contra para México se pueden resumir así: i) el salario mínimo tuvo una pérdida de 18% y *el del sector manufacturero cayó 20.6 por ciento entre los años 1993 y 2001*; ii) la mayor parte del empleo generado se dio en el subsector maquilador; iii) aumentó la pobreza, reconociéndose por lo menos a 55 millones de pobres; iv) aumento del deterioro ambiental; v) mayor volatilidad financiera; vi) los campesinos abandonan sus tierras en busca de oportunidades de trabajo en las ciudades y en granjas corporativas del norte de México y los Estados Unidos.

Para el año 2004 uno de los retos y prioridades que deberá superar y atender la economía mexicana en el contexto de la globalización es: establecer las bases y acuerdos para recuperar la competitividad de la industria nacional. Algunas debilidades a resolver se localizan en los rubros de: atraso tecnológico y sistema educativo.

El Estado participa y participará menos en la economía; ha pasado de gastar en beneficio de la población más del 40% del PIB -a principios de los ochenta- a casi el 20% para el 2004. Lo anterior se ha dado desde que México "optó" por un modelo exportador que ha entrado en crisis.

2.3 REGISTROS Y ESTADÍSTICAS.

Según datos oficiales del INEGI[5], el crecimiento acumulado de la economía mexicana en los años 2000, 2001 y 2002 fue de 1.9 por ciento, el más bajo para periodos similares desde el régimen de Adolfo Ruiz Cortines, hace 50 años. En promedio anual sólo se registra una expansión de 0.63 por ciento.

Lo mismo en circunstancias de crisis que de estabilidad, la economía mexicana perfiló una marcada tendencia al alza en los primeros tres años de cada gobierno, desde la devaluación de 1953.

La tabla siguiente señala que para 1998 la industria manufacturera en la clase de fabricación de auto-partes y accesorios para automóviles y camiones, existían 483 empresas que daban empleo a 52, 445 trabajadores.

Tabla 2.- Condensado del libro de Actividades de Producción de Bienes. Censo Económico 1999. Minería y Extracción de Petróleo. Manufacturas. Electricidad. Captación, tratamiento y suministro de Agua. INEGI.

CARACTERISTICAS PRINCIPALES DE LAS UNIDADES ECONOMICAS, SEGUN SECTOR, SUBSECTOR, RAMA Y CLASE DE ACTIVIDAD
Datos referentes a 1998

SECTOR, SUBSECTOR, RAMA Y CLASE DE ACTIVIDAD	UNIDADES ECONOMICAS			PERSONAL OCUPADO	REMUNERACIONES	VARIACION DE EXISTENCIAS	ACTIVOS FIJOS NETOS	FORMACION BRUTA DE CAPITAL FIJO	PRODUCCION BRUTA TOTAL	INSUMOS TOTALES	VALOR AGREGADO CENSAL BRUTO
	TOTAL	PRODUCTORAS	AUXILIARES		MILES DE PESOS						
SECTOR 3 INDUSTRIAS MANUFACTURERAS, INCLUYE LOS ESTABLECIMIENTOS MAQUILADORES	344 118	337 469	6 649	4 232 322	199 043 828	37 758 325	867 555 618	89 363 432	1 829 118 682	1 348 005 677	581 113 005
SUBSECTOR 38 PRODUCTOS METALICOS, MAQUINARIA Y EQUIPO, INCLUYE INSTRUMENTOS QUIRURGICOS Y DE PRECISION	60 221	58 952	1 269	1 318 898	66 128 909	12 535 570	196 642 498	24 017 414	586 346 365	398 663 346	187 683 019
RAMA 3841 INDUSTRIA AUTOMOTRIZ	1 569	1 472	97	186 799	16 624 352	5 148 574	88 820 185	9 589 177	265 907 966	199 494 931	66 413 035
CLASE 384126 FABRICACION DE OTRAS PARTES Y ACCESORIOS PARA AUTOMOVILES Y CAMIONES	493	466	27	52 445	3 270 987	641 147	9 045 792	1 561 480	25 746 573	16 965 568	8 661 005

El Índice de Volumen Físico de la producción industrial en lo que se refiere a la industria de la manufactura, se incrementó en diciembre del año pasado en 2.4 %. Esta cifra contrasta con el Índice de Personal Ocupado en la Industria Manufacturera que se contrajo –3.8 %. El valor del PIB en México, comparado con el dato de los países de referencia de la Tabla 3 presenta diferencias tales como que el porcentaje total es de 4 en Estados Unidos contra 0.4 de México. Los valores de incremento en porcentaje son aún mayores a favor de Canadá y Francia.

[5] La Jornada.

El comportamiento del desarrollo de la industria manufacturera desde julio de 2001 y hasta diciembre de 2003 muestra que solo en siete meses se tuvieron porcentajes positivos. En general los tres años presentados cerraron con porcentajes de variación anual negativos.

Tabla 3.- Condensado del Cuaderno de Información Oportuna. 2004. Primera Edición. 344 pp. INEGI.

Resumen

Febrero de 2004

Concepto	Periodo	2002 [p]	2003	Variación porcentual
1. Actividad Económica				
PIB (millones de pesos a precios de 1993)	III trim.	1 581 810.4	1 588 118.4	0.4
Índice de Volumen Físico de la Producción				
Industrial (1993=100)	Diciembre	125.7	128.7	2.4
Minería	Diciembre	121.9	127.7	4.8
Industria Manufacturera	Diciembre	129.2	132.3	2.4
Construcción	Diciembre	109.9	114.0	3.7
Electricidad, Gas y Agua	Diciembre	134.5	131.3	-2.4
Producción de Petróleo Crudo (MBD)	Diciembre	3 269.0	3 455.0	5.7
Índice de Volumen Físico de la Producción				
Minerometalúrgica (1993=100)	Noviembre	114.8	112.3	-2.2
2. Empleo				
Tasa de Desempleo Abierto (48 áreas urbanas)				
Total	Diciembre	2.1	3.0	0.9 [a]
Hombres	Diciembre	2.2	2.8	0.6 [a]
Mujeres	Diciembre	2.1	3.3	1.2 [a]
Índice de Personal Ocupado en la Industria Manufacturera (1993=100)	Noviembre	89.7	86.3	-3.8
Personal Ocupado en la Industria Maquiladora de Exportación (miles de personas)	Noviembre	1 085.2	1 070.8	-1.3
Asegurados en el IMSS (miles de personas)				
Total	Diciembre	15 517.0	15 749.0	1.5
Permanentes	Diciembre	13 825.0	14 051.0	1.6
Eventuales	Diciembre	1 692.0	1 699.0	0.4
9. Indicadores Internacionales				
PIB (miles de millones de dólares a precios corrientes)				
Canadá	III trim.	736.0	871.3	18.4
Estados Unidos	III trim.	10 428.3	10 846.7	4.0
Francia	III trim.	376.4	436.0	15.8
Índice de Precios al Consumidor (variación porcentual anual)				
Alemania	Diciembre	1.2	1.1	-0.1 [a]
Estados Unidos	Diciembre	2.3	1.9	-0.4 [a]
Japón	Diciembre	-0.3	-0.4	-0.1 [a]
Saldo de la Balanza Comercial FOB-CIF (miles de millones de dólares)				
Estados Unidos	Noviembre	-46.57	-46.49	-0.2
Japón	Noviembre	7.46	9.34	25.2
Reino Unido	Noviembre	-7.43	-7.86	5.8
Tasas de Interés en EE.UU. y Londres				
Prime	Enero [*]	4.25	4.00	-0.3 [a]
Libor (3 meses)	Enero [*]	1.41	1.13	-0.3 [a]

[a] Variaciones absolutas expresadas en puntos.

[b] Incluye maquiladoras

[c] Saldos corrientes al cierre del mes en millones de pesos

[*] Se refiere al periodo 2003-2004.

Tabla 4.- Volumen físico de la producción por actividad económica.

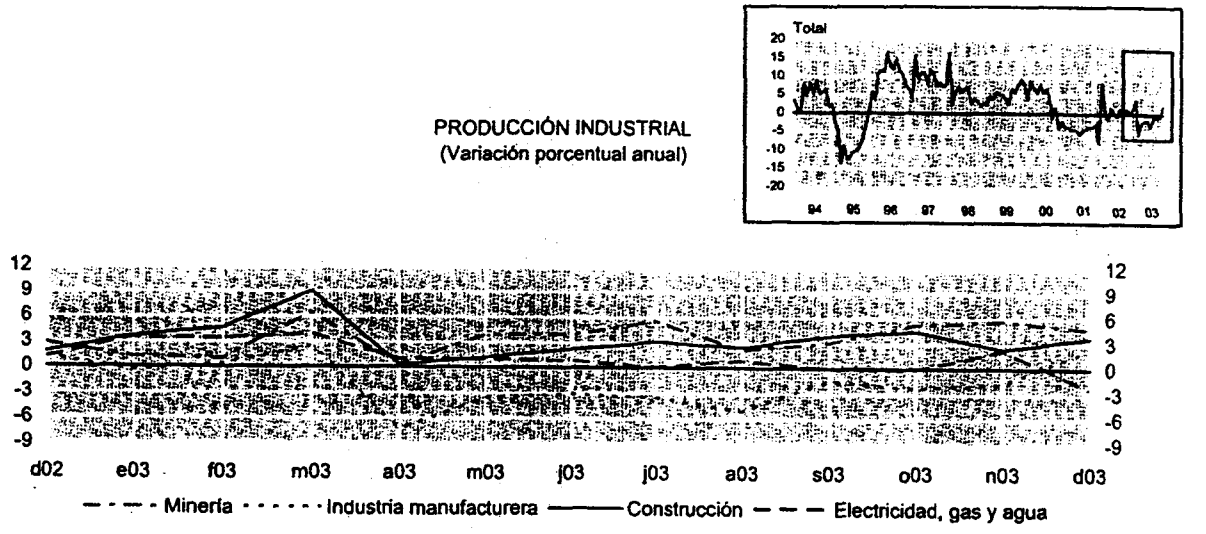
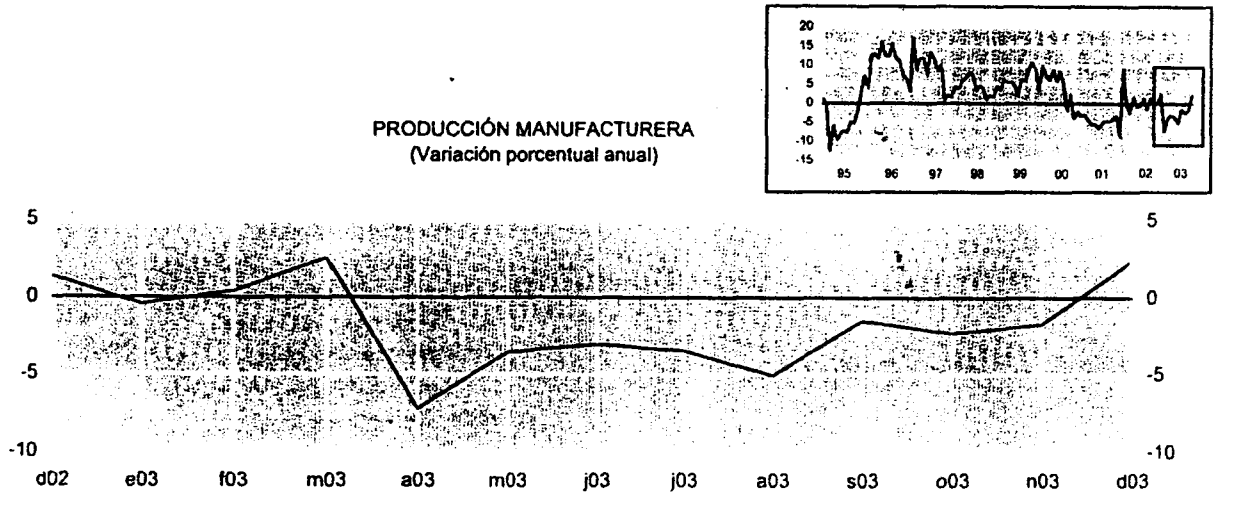
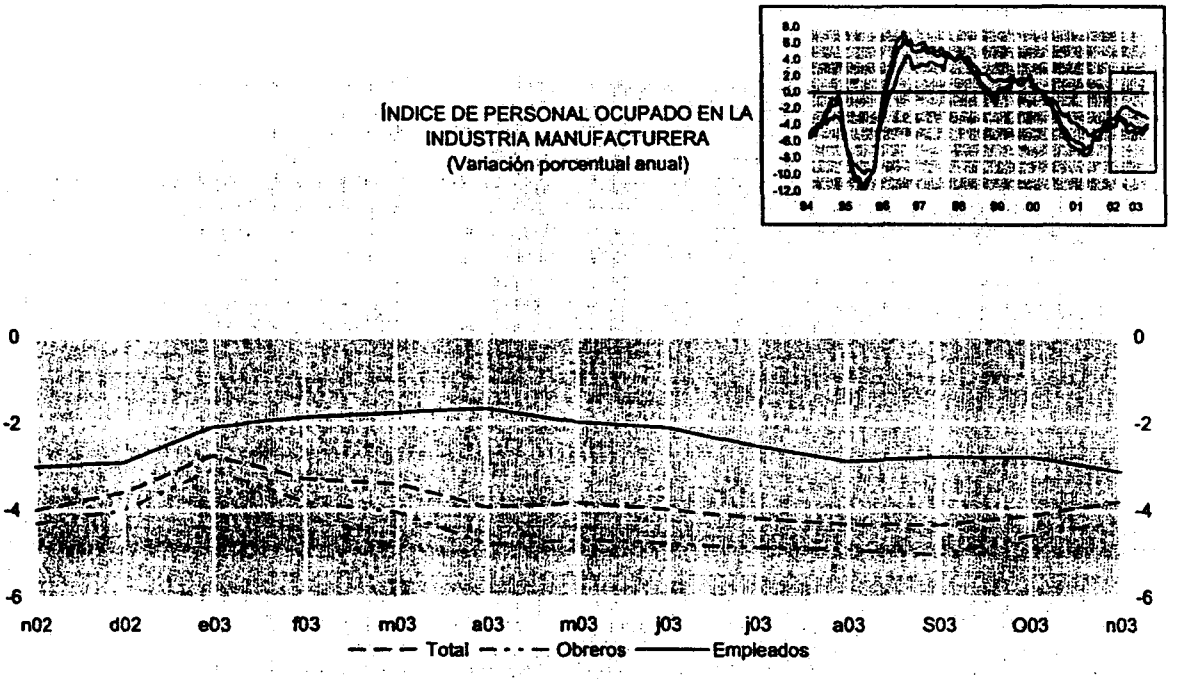


Tabla 5.- Comportamiento del Índice de Volumen Físico de la producción manufacturera.



La tabla 6 presenta el comportamiento que ha tenido el Índice de Personal Ocupado en la industria manufacturera. En todos los valores de la variación porcentual presenta cifras negativas. Aun con las cifras presentadas anteriormente todavía existen declaraciones que parecen alentar (aunque sin fundamentos concretos) la crisis manufacturera que vive el país.

Tabla 6.- Empleo y Salario. Índice de Personal Ocupado en la industria manufacturera. Variación porcentual.



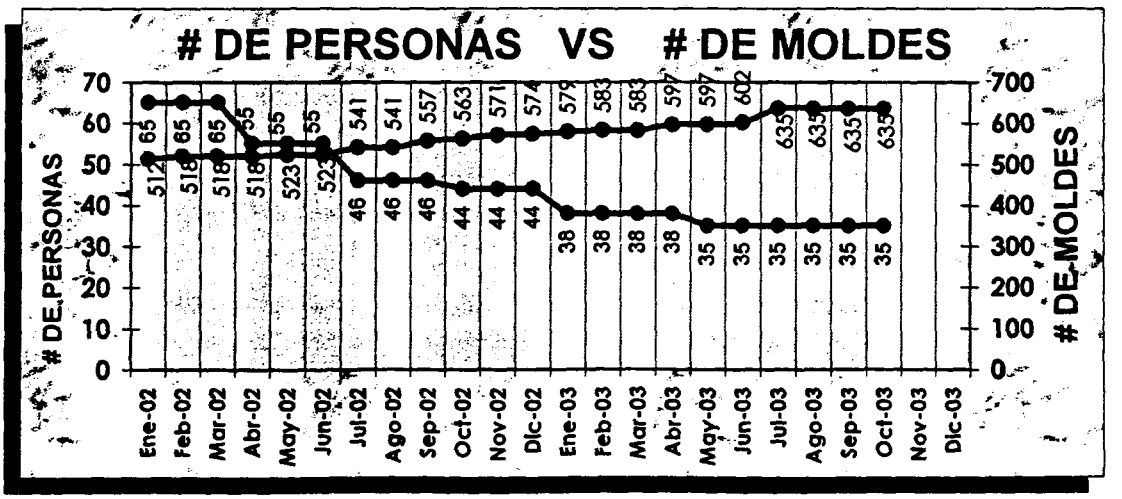
3. MODELOS DE TALLER DE MANTENIMIENTO.

3.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA. JUSTIFICACIÓN.

Buscando reaccionar de forma positiva ante los efectos de la globalización, la empresa sufrió una contracción generalizada hace dos años. Algunos de los sucesos y condiciones más relevantes para el taller han sido:

1.- Reducción de personal del 47%.
2.- Mantener en condiciones de producir a 630 moldes de inyección de plástico.
3.- En el último año se han recibido 50 moldes nuevos; es decir, se ha incrementado la cantidad de herramientas en 8.5%. Se proyecta recibir para los próximos dos años 200 moldes de inyección de plástico que forman parte de los nuevos proyectos del grupo. Se ve la necesidad de optimizar las actividades internas del área.

Tabla 7.- Gráfica: Relación de la cantidad de personal operativo vs. número de moldes.



4.- Actualmente cuenta con 34 trabajadores organizados en doce áreas operativas que, a saber son:

1.- Diseño y programación CNC (2).
2.- Metrología (1).
3.- Erosión por penetración y por hilo (2).
4.- Torno (1).
5.- Rectificado (1).
6.- Ajuste de moldes (17).
7.- Ajuste de dispositivos (1).
8.- Ajuste de troqueles (1).
9.- Fresado (2).
10.- Almacén (1).
11.- Mantenimiento eléctrico (1).
12.- Supervisión y abasto (4).

5.- El personal está distribuido de tal forma que se asegura el servicio las 24 horas del día los 365 días del año.

6.- El funcionamiento actual es complejo, debido a que el balance del flujo de trabajo debe realizarse bajo diferentes consideraciones:

- Manejo de prioridades.
- Complejidad de baja a alta y cortos tiempos de trabajo.
- Disponibilidad y cantidad de personal restringido.
- Habilidades del personal variables.
- Limitantes de tiempo en el trabajo continuo por persona.

7.- Siempre existe incertidumbre en la cantidad y tipo de trabajos que pueden llegar a ser solicitados.

8.- Reducción del 30% en los gastos generados por la compra de materiales indirectos.

3.1.1 PROPUESTA.

Debido a lo anterior, y a que no existen modelos cualitativos y cuantitativos que puedan establecer relaciones para realizar mejoras, se plantea la siguiente propuesta:

Establecer los principios que den inicio al desarrollo de un modelo que describa las funciones e interrelaciones que se llevan a cabo para los casos más importantes en los que se requiera del servicio del taller de mantenimiento de moldes de inyección de plástico. Este modelo servirá como base a trabajos posteriores que busquen formalizar el análisis enfocado al sistema.

3.1.2 OBJETIVOS.

- Identificar los factores más relevantes que intervienen en el sistema "taller de mantenimiento de moldes de inyección de plástico", definiendo las variables del modelo y sus rangos de variación.

- Caracterizar los factores que intervienen en el sistema, tales como: prioridades, grado de complejidad del trabajo, habilidades del personal, interacción entre departamentos, etc.

- Idear y estructurar un modelo para un sistema típico de mantenimiento, proponiendo una representación y notación que codifique los trabajos según su prioridad, secuencia, recursos disponibles y asignados, etc.

- El modelo establecido debe formular la estructura para disponer de la información para tomar decisiones confiables y posteriormente ser objeto de análisis mediante alguna de las técnicas de simulación.

3.2 METODOLOGÍA DE SOLUCIÓN DEL PROBLEMA.

El modelo es solamente una aproximación y, por tanto, no se comportará exactamente como el sistema original. El que exista cualquier tipo de relación entre el comportamiento del modelo y el comportamiento del sistema, depende de que tan válido y que tan razonable haya sido el análisis, la abstracción, la simplificación y la síntesis al inicio del trabajo.

El proceso mediante el cual el investigador deduce un modelo de un sistema que está estudiando, puede describirse mejor como arte intuitivo. Cualquier conjunto de reglas para desarrollar modelos tiene utilidad limitada en su máxima expresión y solamente puede servir como una estructura o planteamiento sugerido.

La efectividad de la modelación consiste en la habilidad que se tiene para analizar un problema, resumir sus características esenciales, seleccionar y modificar las suposiciones básicas que caracterizan el sistema, y luego enriquecer y elaborar el modelo hasta obtener una aproximación útil.

En el desarrollo de este trabajo se realiza el análisis de las funciones del taller de mantenimiento de moldes de inyección, sus componentes y divisiones. Posteriormente se procederá a la

caracterización y clasificación de los componentes más importantes que resulten del paso anterior y se agregará el método para relacionarlos y analizarlos.

Finalmente se realizará la estructuración de los componentes sobre la base de la relación que tienen entre sí y la influencia de las variables internas y externas.

3.2.1 PRINCIPIOS A CONSIDERAR.

Un problema es un estado de necesidad insatisfecha. Una situación se vuelve un problema cuando el efecto de la operación del sistema no proporciona los resultados deseados.

En consecuencia, el primer paso para definir el sistema por estudiar es efectuar un análisis de las necesidades del entorno. Esto siempre empieza con la especificación de los objetivos y el establecimiento de las condiciones de frontera; es decir, que forma y que no forma parte del sistema por estudiar.

Se define a un sistema como un conjunto de objetos reunidos en alguna interacción o interdependencia regular o irregular. En la mayoría de los casos, el interés principal se centra en los sistemas dinámicos donde las interacciones provocan cambios con el tiempo. El sistema a analizar en este trabajo es el sistema "taller de mantenimiento de moldes de inyección de plástico".

Los sistemas en que los cambios son predominantemente suaves se les conoce como sistemas continuos. Por otra parte los sistemas en donde los cambios son predominantemente discontinuos, se les conoce como sistemas discretos. Hay pocos sistemas totalmente discontinuos o totalmente discretos, en la mayoría de los sistemas predomina un tipo de cambio de manera que por lo general se puede clasificar a los sistemas como continuos o discretos.

Se utiliza el término endógena para describir las actividades que ocurren dentro del sistema, y el término exógena para describir las actividades en el medio ambiente, que afectan al sistema. Al sistema para el que no existe actividad exógena se le conoce como sistema cerrado en comparación con un sistema abierto que sí tiene actividades exógenas.

Al estudiar un sistema, se puede apreciar que hay determinados objetos distintos y cada uno de los cuales tienen propiedades de interés. También ocurren determinadas interacciones en el sistema que producen cambios en el mismo. Se utiliza el término *entidad* para denotar un objeto de interés en un sistema; el término *atributo* denota una propiedad de una entidad. Desde luego, pueden haber muchos atributos de una entidad dada. Todo proceso que provoque cambios en el sistema se conocerá como *actividad.* Se utiliza el término *estado del sistema* para indicar una descripción de todas las *entidades, atributos y actividades* de acuerdo con su existencia en algún punto del tiempo. El progreso del sistema se estudia siguiendo los cambios en el estado del mismo.

Conforme se avance en el desarrollo de este trabajo se identificará cada uno de los componentes del sistema del taller. Las *entidades* se denotarán como las *estaciones de trabajo y los operadores*. En la parte de la caracterización y clasificación se tratarán a detalle los atributos y las actividades. Los atributos se identificarán como las capacidades que tiene cada una de las estaciones o las habilidades que tiene cada uno de los operadores.

Otra distinción que debe de establecerse entre las actividades depende de la manera en que se podrán describir. En donde es posible describir completamente el resultado de una actividad en términos de su entrada se dice que la actividad es *determinista*. Cuando los efectos de la actividad varían aleatoriamente en distintas salidas, se dice que la actividad es *estocástica*.

El carácter aleatorio de una actividad estocástica parecería implicar que la actividad es parte del medio ambiente del sistema ya que no se conoce el resultado exacto en ningún momento; sin embargo, con frecuencia se puede medir el carácter aleatorio y expresarlo en forma de una distribución de probabilidad. Si la ocurrencia de esa actividad está bajo control del sistema, se le considera, como endógena. Por el contrario, si la ocurrencia de la actividad es aleatoria, constituye parte del medio ambiente.

Se sugieren los siguientes principios a considerar durante el desarrollo de un modelo:

1.- Dividir el problema del sistema en problemas más simples.
2.- Establecer una definición clara de los objetivos.
3.- Buscar analogías.
4.- Considerar un ejemplo numérico específico del problema.
5.- Establecer algunos símbolos.
6.- Escribir los datos obvios.
7.- Si se obtiene un modelo manejable, enriquecerlo. De otra manera, simplificarlo.

Un buen modelo de simulación debe ser:

1.- Fácil de entender por parte del usuario.
2.- Dirigido a metas u objetivos.
3.- Sensato, en cuanto que no de respuestas absurdas.
4.- Fácil de controlar y manipular por parte del usuario, es decir, debe ser sencillo comunicarse con el modelo.
5.- Completo, en lo referente a asuntos importantes.
6.- Adaptable con un sencillo procedimiento para modificar el modelo o para actualizarlo.
7.- Evolutivo, es decir, que debe ser sencillo al principio y debe volverse más complejo, de acuerdo con el usuario.

Después de haber especificado las metas y objetivos del estudio y definido los límites del sistema, se reduce el sistema real a un diagrama de flujo lógico o un modelo estático. Se debe construir un modelo del sistema real que no simplifique demasiado el sistema al punto donde el modelo se

vuelva trivial (o peor aún, engañoso) y que no contenga demasiados detalles de manera que se convierta en algo mal hecho o sumamente costoso.

El peligro al empezar con un diagrama de flujo de la operación real radica en que el modelo tiende a ser demasiado detallado y a incluir elementos que contribuyen en poco o nada al entendimiento del problema. La tendencia es casi siempre simular con demasiado detalle en vez de con muy poco detalle.

3.2.2 MODELADO DEL SISTEMA.

El modelado es una metodología aplicada y experimental que intenta:

a) Describir el comportamiento de sistemas.
b) Postular teorías o hipótesis que expliquen el comportamiento observado.
c) Usar estas teorías para predecir un comportamiento futuro, es decir, los efectos que se producirán mediante cambios en el sistema o en su método de operación.

Para fines de casi todos los estudios, no es necesario tener en cuenta todos los detalles de un sistema; en consecuencia, un modelo no sólo es el sustituto de un sistema, sino también una simplificación del mismo.

Se define un modelo como el cuerpo de información relativa a un sistema recabado con el fin de estudiarlo. Ya que el propósito del estudio determina la naturaleza de la información que se reúne, no hay un modelo único de un sistema. Distintos analistas interesados en diferentes aspectos de un sistema producirán distintos modelos del mismo sistema según cambie su comprensión.

La tarea de obtener un modelo de un sistema se dividirá en forma genérica en dos sub-tareas: la determinación de la estructura del modelo y proporcionar los datos.

La determinación de la estructura, fija la frontera del sistema e identifica las entidades, atributos y actividades del mismo. Los datos suministran los valores de los atributos que pueden tener y definen las relaciones involucradas en las actividades. Las dos tareas de crear una estructura y suministrar los datos se definen como partes de una tarea más que como dos tareas por separado, debido a que por lo general están tan íntimamente relacionados que no se puede hacer una sin la otra. Las suposiciones relativas al sistema orientan la recolección de datos, y el análisis de estos confirma o refuta las suposiciones. Es común que los datos recolectados revelen una relación no sospechada que cambie la estructura del modelo.

Se han utilizado muchos tipos de modelos en los estudios de sistemas, además de haberse clasificado en una diversidad de maneras. A veces la clasificación se realiza en términos de la naturaleza del sistema que modela, tal como continuo vs. discreto o determinista vs. estocástico.

Una segunda distinción la constituyen los modelos estáticos y modelos dinámicos. En el caso de los modelos matemáticos, una tercera distinción es la técnica que se emplea para resolver el modelo. Se establece una distinción entre los modelos analíticos y numéricos.

Existen también los modelos físicos. Un ejemplo de éstos, son los modelos a escala que se utilizan en los túneles de viento y tanques de agua para estudiar el diseño de aeronaves y naves acuáticas. Las leyes bien establecidas en la similitud permiten realizar deducciones exactas relativas al comportamiento de un sistema a escala natural a partir del modelo a escala. Se han descrito otros tipos de modelos físicos como modelos icónicos, es decir, modelos que "semejan" al sistema que modelan; por ejemplo, los modelos de las estructuras moleculares formados a partir de esferas que representan a los átomos, con varillas que representan los enlaces atómicos.

No es posible suministrar reglas según las cuales se construyan modelos, aunque sí se puede expresar una diversidad de principios guía que no describan los pasos claros que se realizan en la construcción de un modelo, sino que describan los distintos puntos de vista desde los cuales se puede juzgar la información a incluir en el modelo.

Formación en bloques.- La descripción del sistema se debe organizar en una serie de bloques, o subsistemas. El propósito de formar los bloques es simplificar la especificación de las interacciones dentro del sistema. Cada bloque describe parte del sistema que depende de pocas, preferiblemente una, variables de entrada y produce unas pocas variables de salida. Luego puede describirse al sistema como un todo en términos de las interconexiones entre los bloques. En forma correspondiente, se puede representar gráficamente el sistema como un diagrama simple de bloques (ver el mapa de la figura 3).

Relevancia.- El modelo sólo debe de incluir los aspectos del sistema relevantes a los objetivos del estudio. A manera de ejemplo, si el estudio del sistema de una fábrica pretende comparar los efectos de distintas reglas de operación en la eficiencia, no es relevante considerar la contratación de los empleados como una actividad. Aunque la información irrelevante del sistema en el modelo no perjudica, se debe de excluir debido a que aumenta la complejidad y genera más trabajo para una solución del mismo.

Exactitud.- Debe tenerse en cuenta la exactitud de la información que se recabe. Por ejemplo, en el sistema de una aeronave, la exactitud con que se describe el movimiento de la misma depende de la representación de la estructura. Puede bastar considerar la estructura como cuerpo rígido y deducir una relación muy simple entre el movimiento de la superficie de control y la dirección a dónde va la aeronave, o puede ser necesario reconocer la flexibilidad de la estructura y dar cabida a las variaciones en la misma. El ingeniero responsable de estimar el consumo de combustible se sentirá satisfecho con la representación simple. En cambio, otro ingeniero, responsable de tomar en cuenta la comodidad de los pasajeros, necesita tomar en cuenta las vibraciones, por lo que querrá la descripción detallada de la estructura.

Agregación.- Un factor adicional que debe de considerarse es el grado con que pueden agruparse las distintas entidades individuales en entidades mayores. En algunos estudios puede ser necesario construir entidades artificiales mediante el proceso de agregación. Por ejemplo, por lo

general un estudio económico o social considera a una población como una cantidad de clases sociales y realiza un estudio como si cada una de éstas fuera una entidad distinta.

A la representación de actividades se deben dar consideraciones semejantes de agregación. Por ejemplo, al estudiar un sistema de defensa con proyectiles, puede no necesitar incluir los detalles del cómputo de una trayectoria de proyectiles para cada disparo. Será suficiente con representar el resultado de muchos disparos mediante una función de probabilidad.

3.2.3 CONSIDERACIONES PARA EL CASO DEL TALLER DE MANTENIMIENTO DE MOLDES DE INYECCIÓN.

Según la información teórica base, el taller de mantenimiento de moldes de inyección no cae dentro de la categoría de los sistemas continuos debido a que no presenta cambios suaves en su desarrollo, sino todo lo contrario, los cambios del taller son predominantemente discontinuos.

El sistema presenta actividades tanto exógenas como endógenas.

Las entidades del sistema corresponden a las estaciones de trabajo y los operadores que realizan las funciones en el área, sus atributos o propiedades se detallarán en el transcurso del modelado.

El taller cae dentro de la clasificación de los sistemas discretos abiertos con un alto grado de influencia del medio ambiente. Las actividades exógenas rigen su accionar y las actividades endógenas buscan cumplir las exigencias del medio ambiente con los recursos del propio sistema.

El tipo de actividades que se presentan es de dos tipos: actividades en las que es posible describir completamente su resultado (deterministas) y actividades estocásticas en donde el resultado es aleatorio.

No se trata de un modelo estático sino de un modelo dinámico, debido a que está interactuando con el medio ambiente a través de actividades que no presentan comportamientos matemáticos. Interviene la variable habilidad junto con el factor humano.

Los pasos y la estrategia de trabajo se establecen como sigue:

1.- Realizar el análisis de las necesidades del entorno (análisis).
2.- Determinar la estructura del modelo (simplificación y síntesis).
3.- Obtención de datos (solo aspectos relevantes y con exactitud).
4.- Esquematizar (abstracción, formación de bloques, agregación).

Lo anterior busca cumplir con los principios utilizados en el modelado de sistemas.

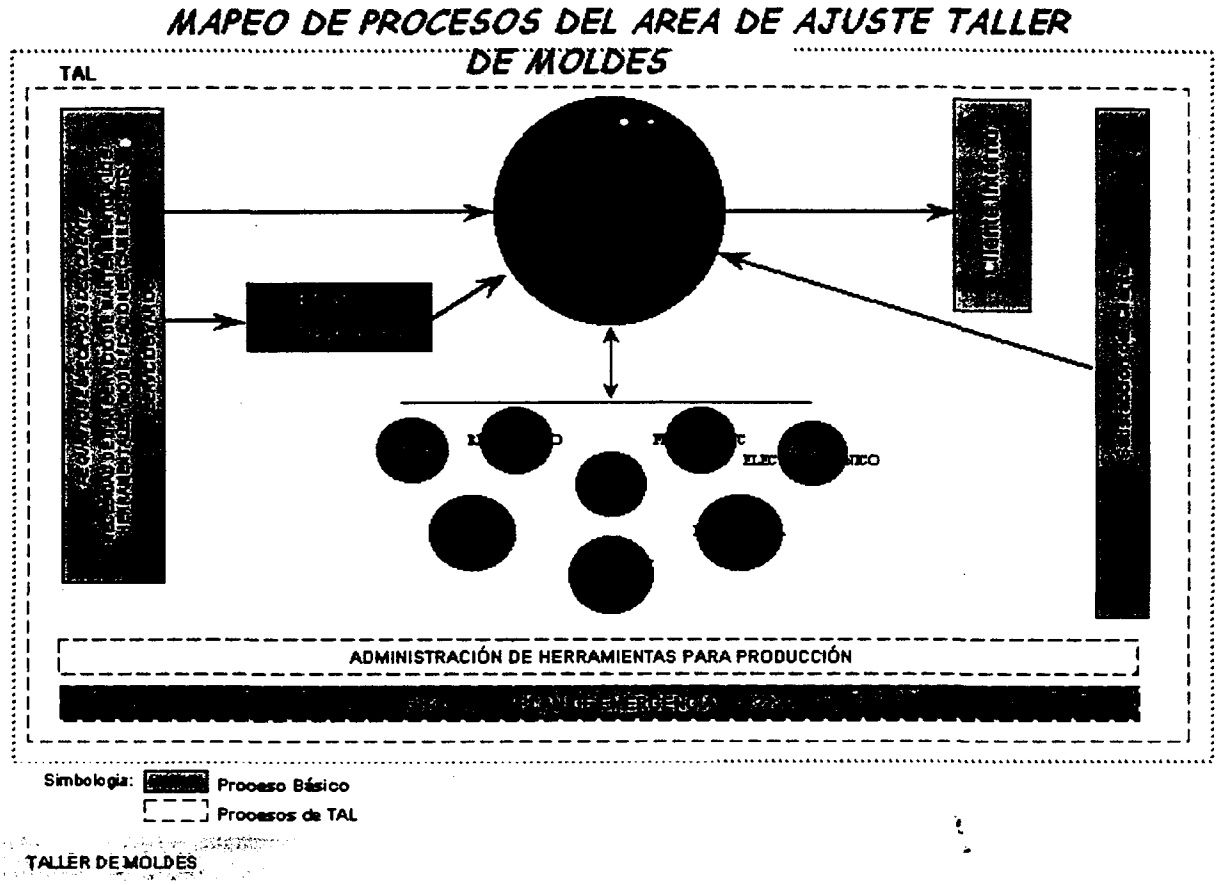


Fig. 3.- Mapa del sistema "taller de mantenimiento de moldes de inyección de plástico".

3.3 EJEMPLO DE RESOLUCIÓN A PROBLEMAS DE PROGRAMACIÓN DEL TALLER (LA RELAJACIÓN LAGRANGIANA).

La programación es uno de los temas más importantes en la planeación y operación de los sistemas de manufactura, pero la generación de programas consistentemente buenos ha probado ser extremadamente difícil. El problema es que las soluciones óptimas de programación involucran procedimientos de numeración costosos e imprácticos, mientras que el funcionamiento de la mayoría de las técnicas heurísticas es difícil de estimar y varia considerablemente de un problema al siguiente. Recientemente, las metodologías de programación basadas en la relajación lagrangiana han mostrado ser computacionalmente eficientes y han entregado soluciones óptimas a problemas de programación de máquinas paralelas e idénticas. En este apartado se explora el uso de la relajación de Lagrange para programar trabajos del taller (job-shop), lo cual incluye múltiples tipos de máquinas, restricciones de precedencia general, y consideraciones de ruteo simple. Utilizando una formulación de Lagrange aumentada, el problema de programación es descompuesto en sub-problemas de nivel-operación para la selección de tiempos de inicio de operación y tipos de máquina, con coeficientes de multiplicación y penalización. Los coeficientes de multiplicación y penalización son entonces actualizados en el nivel alto. La solución forma la base de un algoritmo de lista-programa que genera un programa factible. También se desarrolla un procedimiento para evaluar la calidad de este programa factible generando un límite inferior en el costo óptimo. Se toman ejemplos numéricos de un taller (job-shop) industrial representativo. Los programas de alta calidad son generados eficientemente cada día por un periodo de tres semanas, con costos generalmente dentro de 4% de sus respectivos limites inferiores. La metodología se compara favorablemente con un método de programación basado en el conocimiento usado en el job-shop al mismo tiempo que las pruebas numéricas.

Las líneas de transferencia (o traslado) han sido establecidas por largo tiempo como el método más eficiente de producir bienes en un medio de manufactura de alto-volumen / baja-variedad. Sin embargo, los medios de manufactura de bajo-volumen / alta-variedad y medio-volumen / media-variedad siempre han estado plagados de dificultades. Los tiempos de entrega y los inventarios de trabajo-en-proceso a menudo son excesivos y la utilización de maquinaria es generalmente baja. Muchos de estos problemas en producción son atribuibles a problemas en la función de programación: no tener las partes correctas cuando estas se necesitan, no tener el equipo disponible cuando este se necesita, utilizar exceso de inventario para "ocultar" problemas y falta de flexibilidad y respuesta. Además, la importancia económica de esos problemas, también puede ser ampliamente definida. De acuerdo con el Dr. Eugene Merchant de Metcut Research Associates, Inc., aproximadamente entre el 50 y 75% de las partes manufacturadas caen en las categorías de bajo-volumen / alta-variedad y medio-volumen / media-variedad y con la tendencia hacia la variedad de los productos este porcentaje esta incrementándose ligeramente[6].

Esta sección presenta una solución metodológica para la programación de job-shops, un ambiente típico para la manufactura de productos de la variedad bajo-volumen / alta-variedad. En un job-

[6] Metcut Research Associates. Inc.. is a Cincinnati based consulting company. Cook (Ref. 10) cites Dr. Merchant's original estimate in 1975, and an update was provided by Dr. Merchant in April 1989 via personal communication.

shop, hay trabajos con varios niveles de importancia y tiempos de entrega para ser procesados por muchos tipos de máquinas (rectificadoras, taladros, etc.). Cada trabajo requiere de una secuencia de operaciones para su terminación, y cada tipo de operación requiere de un tipo específico de máquina por una duración de tiempo especificado. Una operación puede comenzar solo cuando todas las operaciones precedentes han sido terminadas. Vea la figura 4 para un taller de muestra con operaciones mostradas de acuerdo a su plan de proceso. Los planes de proceso usualmente son diferentes para diferentes trabajos. La capacidad de cada tipo de máquina es finita y puede ser de tiempo variable.

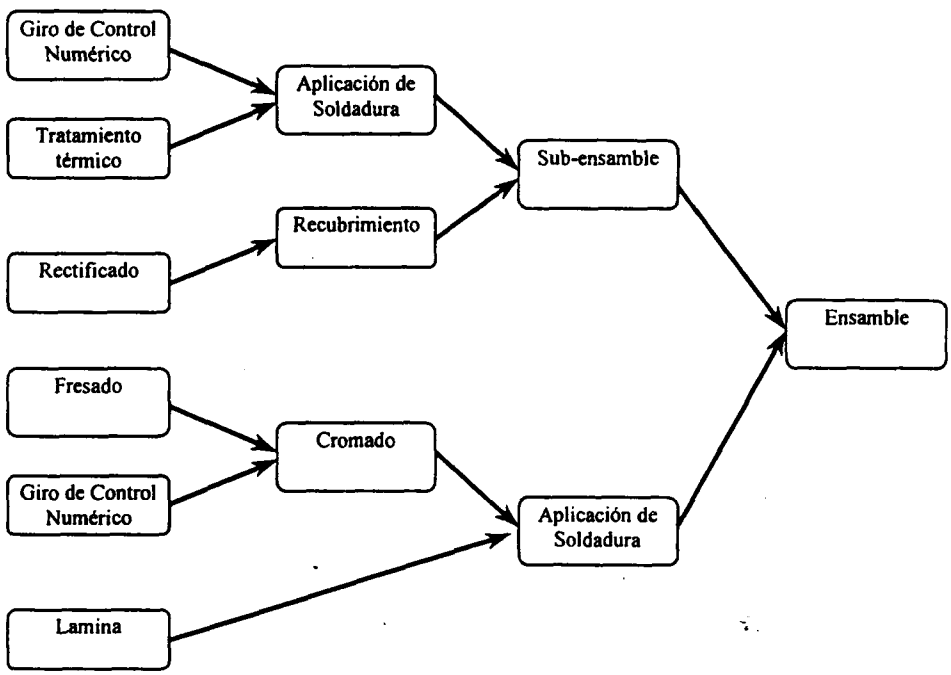


Fig. 4.- Un ejemplo de Plan de Proceso.

Debido a las dificultades intrínsecas de la programación del taller (job-shop), las metodologías de programación óptima requieren de enumeración cara y que lleva tiempo (Ref. 24). Desde que un job-shop puede involucrar cientos de máquinas y miles de trabajos para ser programados en un periodo que varia desde muchos meses hasta unos cuantos años, el tamaño del problema de programación hace de tales metodologías algo poco práctico. Así, hay una necesidad imperiosa de una metodología de programación práctica (Ref. 2). Se muestra, no la obtención del programa óptimo sino, el programa cercano a lo óptimo con funcionamiento cuantificable y dentro de un tiempo de computo razonable.

Se dirige el problema de programación del job-shop a través de una aproximación aumentada de la relajación de Lagrange. Este método es único (según los autores de la referencia) para problemas de programación de taller (job-shop), y despliega muchas ventajas sobre otros planteamientos. El problema de la programación es descompuesto en sub-problemas de nivel-operación para la selección de los tiempos de inicio de operación y tipos de máquinas, con coeficientes de multiplicación y penalización dados. Los coeficientes de multiplicación y

penalización son entonces actualizados al nivel alto. La solución forma las bases de un algoritmo de lista-programa que genera un programa factible. Un procedimiento también es desarrollado para evaluar la calidad de este programa factible generando un límite inferior en el costo óptimo. El método presentado está diseñado para la generación práctica de programas en talleres industriales (industrial job-shops). El uso del método es demostrado por la programación de un banco de máquinas de control numérico (NC) en un taller actual durante un periodo de tres semanas.

El problema de programación de un taller (job-shop) ha sido sujeto a una intensa investigación desde hace por lo menos treinta años. Como tal, la sección 3.3.2 está dedicada a una descripción de las diferentes propuestas. Una formulación completa del problema de programación del taller es presentada en la sección 3.3.3. La sección 3.3.4 describe la estructura de la relajación de Lagrange (Lagrangian relaxation framework), la metodología desglosada de la solución y la derivación de un posible programa. Para evaluar la calidad del programa, la formulación del segundo problema se describe en la sección 3.3.5. Finalmente, los resultados numéricos presentados en la sección 3.3.6 demuestran el potencial de la propuesta para programar job-shops de tamaños reales.

En la programación de los job-shops, la metodología más común es "materials requirement planning (MRP)"; sin embargo, MRP es más una herramienta de planeación y no está realmente diseñada para programación de nivel detallado (Ref. 36). En muchas compañías, la programación es realizada por personal experimentado del taller con un lápiz y papel y unas cuantas ayudas gráficas (tales como diagramas de Gantt) y quizá una moderna base de datos industrial (Ref. 17, 29 y 36). Las reglas del despacho simple son utilizadas a menudo para resolver problemas inmediatos, tales como organizar secuencias en el nivel de centro-de-trabajo (Ref. 29 y 36). El resultado puede ser programar un caos, donde las fechas de terminación no pueden ser anticipadas y el inventario del trabajo en proceso (work-in-process WIP) se incremente. Algunas veces, aun la gerencia de alto nivel debe dar seguimiento a los trabajos de alta prioridad en el piso del taller (Ref. 2).

Muchas reglas de despacho han sido presentadas e implementadas basándose en fechas de entrega, lo crítico de las operaciones, tiempos de procesamiento y utilización de recursos (Ref. 6). La "razón crítica" definida como una razón de tiempo de procesamiento restante sobre tiempo restante a la fecha de entrega, ha sido muy popular en los job-shops (Ref. 17). Heurísticos más complicados toman en cuenta alguna combinación de los factores anteriores. Por ejemplo, el algoritmo de Viviers' (Ref. 35) incorpora tres clases de prioridades en la regla del tiempo de procesamiento más corto (shortest processing time SPT). A cada trabajo es asignado un índice igual a su tiempo de procesamiento más un nivel de valor a su clase de prioridad. Los trabajos de alta prioridad tienen valores de bajo índice y son procesados primero de acuerdo a la regla SPT. Los heurísticos han sido evaluados comparativamente (e.g. Ref. 3). Muchas propuestas de inteligencia artificial (artificial intelligence AI, Ref. 16, 23 y 31) también usan reglas de despacho o heurísticos para programar. Generalmente es muy difícil evaluar el funcionamiento de programas generados por estos métodos. Los resultados pueden también depender del orden inicial de los trabajos. Esto implica que cambios menores en los trabajos y/o la disponibilidad de los recursos de un día a otro pueden resultar en programas demasiado diferentes.

Se han dado arreglos de esfuerzos concentrados en metodologías de optimización. Los métodos en esta categoría incluyen programación dinámica (Ref. 19) y el método de rama-y-límite (branch-and-bound, Ref. 12). Estos métodos requieren por lo menos enumeración parcial de posibles secuencias. Debido a que el número de posibles secuencias crece exponencialmente conforme el tamaño del problema crece (Ref. 24), estos métodos son muy intensivos en el uso de la computadora aún para talleres de pequeño tamaño. Carlier y Pinson (Ref. 8), por ejemplo, resuelven por primera vez un problema de taller de diez-tareas, diez-máquinas colocado originalmente en un texto de ingeniería industrial de 1963.

Aunque éste no es un gran problema comparado con los estándares de la industria, la solución óptima requirió algo así como 4 h (17 982 s) de tiempo CPU en una computadora PRIME 2655. Adicionalmente, el programa ya no pudo ser óptimo después de la llegada de una nueva tarea o la descompostura de una máquina. La regeneración del programa significa otra corrida de la computadora excesivamente larga para obtener un nuevo programa.

Se han realizado intentos para cerrar la brecha entre las aproximaciones heurísticas y las aproximaciones de optimización (e.g., Fisher *et al. Ref. 15,* Adams *et al. Ref. 1,* Luh *et al. Ref. 27*). En Adams *et al.*, por ejemplo, un heurístico para un problema de taller fue desarrollado basado en la solución óptima de problemas de secuencia de máquinas sencillas. Se desarrolló un criterio para medir la ocupación de las máquinas. Primero se desarrollo la secuencia de trabajo para la máquina mas ocupada (el cuello de botella). Entonces, la secuencia de trabajo para la siguiente máquina más ocupada fue determinada, y la solución fue alimentada en el problema de la máquina resuelto previamente por una "re-optimización local". Sin embargo, la evaluación de problemas podría ser alcanzada solamente a través de "enumeración selectiva". Recientemente, la técnica de relajación lagrangiana ha sido utilizada para resolver problemas de programación. El método puede descomponer un problema en un número de pequeños sub-problemas, los cuales son más fáciles de resolver. Esto también puede proveer un límite inferior angosto en el costo óptimo. Fisher (Ref. 12) usa el límite inferior de la relajación lagrangiana para obtener un método de enumeración más eficiente para una clase de problemas de programación de taller. Más recientemente, se ha usado la técnica para obtener soluciones cercanas a las óptimas dentro de una programación de máquinas paralelas e idénticas (Ref. 20 y 27). En este apartado se explora el uso de la relajación lagrangiana para programar job-shops que incluyen múltiples tipos de máquinas, restricciones de precedencia genérica y consideraciones de ruteo simple.

El método mostrado aquí es una extensión de trabajos previos desarrollados por los autores en la programación de máquinas idénticas y paralelas para trabajos de operación sencilla (Ref. 27) y para trabajos de multi operación con restricciones de precedencia de tipo rama / junta (Ref. 20). A pesar de que es más probable que estos problemas de programación sean todos de dificultad NP, el esfuerzo requerido para encontrar los programas para los diferentes tipos de problemas puede variar considerablemente. En general, las restricciones de precedencia complican el problema de programación (Ref. 25). Por ejemplo, en Ref. 20, un procedimiento de enumeración computacional intensiva fue usado para manejar las restricciones de precedencia, un paso no requerido por la metodología de la programación de las máquinas paralelas de (Ref. 27). Sin embargo, la aproximación de (Ref. 20) es poco práctica si un trabajo tiene más de tres o cuatro operaciones. En este apartado, una aproximación de descomposición se utiliza para manejar

restricciones de precedencia, haciendo la aproximación manejable para trabajos con estructuras de precedencia genérica. Máquinas diferentes y consideraciones de ruta complican el problema.

3.3.1 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.

El tiempo-discreto, formulación de programación entera desarrollada aquí sigue el modelo de (Ref. 20 y 27). Esto también ha sido influenciado por el trabajo de Bruvold y Evans (Ref. 7) en algunas definiciones de variables; Norbis y Smith (Ref. 30) en el establecimiento de algunas restricciones; y generalmente por Everett (Ref. 11), Fisher (Ref. 12), Fisher *et al Ref. 14*, y Conterno y Ho (Ref. 9). Primero, las siguientes variables deben ser definidas, donde la operación j del trabajo i es identificada como una operación (i, j).

δ_{ijkh} Variable entera igual a 1 si la operación (i, j) está activa en la máquina tipo h en el tiempo k.

b_{ij} Tiempo de inicio de operación (i, j).

c_{ij} Tiempo de terminación de operación (i, j).

C_i Tiempo de terminación del trabajo i.

D_i Fecha de entrega del trabajo i.

H Número de tipo de máquinas.

H_{ij} Grupo de tipo de máquinas capaces de realizar la operación (i, j).

I_{ij} Grupo de operaciones del trabajo i seguido inmediatamente por operación (i, j).

J Función objetivo para ser optimizada.

K Tiempo horizonte bajo consideración.

M_{kh} Capacidad de máquina tipo h en el tiempo k.

m_{ij} Tipo de máquina seleccionada para la operación del proceso (i, j); $m_{ij} \epsilon H_{ij}$.

N Número de trabajos.

N_i Número de operaciones para el trabajo i.

S_{ijl} Período de tiempo fijo entre operaciones (i, j) y $(i, l) \epsilon I_{ij}$ cuando el trabajo no está disponible para programarse (paro requerido).

T_i Retraso del trabajo i definido como max $[0, C_i - D_i]$.

t_{ijh} Tiempo de procesamiento de la operación (i, j) en el tipo de máquina $h \epsilon H_{ij}$.

w_i Peso (valor o importancia) del trabajo i.

Se asume que las restricciones de precedencia de un trabajo forman una gráfica acíclica dirigida y, sin pérdida de generalidad, que cada trabajo termina con una operación sencilla de tal forma que $C_i = c_{i, N_i}$.

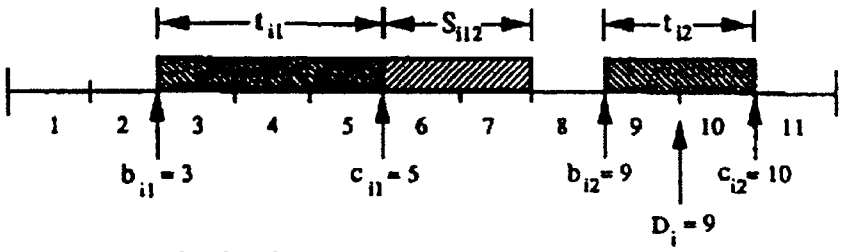
El procesamiento del trabajo se asume para no ser preferencial, de tal forma que un bloque de tiempo de longitud t_{ijh} es necesario para procesar la operación (i, j) en la máquina $h \epsilon H_{ij}$. Todo los trabajos se consideran disponibles para procesamiento en el tiempo 1 (será relajada en la sub-sección 3.3.4-C), y se asume que el tiempo horizonte K es lo suficientemente largo para completar todos los trabajos. (i.e., $C_i \leq K$ para todo i = 1, 2, ..., N).

A lo largo de las variables anteriores, el tiempo horizonte K, el número de trabajos N, los pesos de los trabajos $\{w_i\}_{i=1}^{N}$, las estructuras de precedencia de los trabajos $\{I_{ij}\}=_{i=1, j=1}^{N, N_i-1}$, los requerimientos de tiempo de procesamiento $\{t_{ijh}\}_{i=1, j=1}^{N, N_i}$, $h \epsilon Hij$, las fechas de entrega $\{D_i\}_{i=1}^{N}$, el número de tipos de máquinas H, la capacidad de la máquina $\{M_{kh}\}_{k=1, h=1}^{N, H}$ y la operación del mapeo de la capacidad de la máquina $\{H_{ij}\}=_{i=1, j=1}^{N, N_i}$ se asume que están dados. Los descansos requeridos S_{ijl} son asumidos como dados, y son usados para modelar tiempos perdidos en las máquinas o tareas que no están consideradas en la formulación del problema (e.g. tiempo de viaje, trabajo de oficina o inspección). Las variables de decisión son los tiempos de inicio de todas las operaciones $\{b_{ij}\}$ y los tipos de máquina $\{m_{ij}\}$. Una vez que son seleccionados $\{c_{ij}\}$, $\{C_i\}$, $\{T_i\}$y $\{\delta_{ijkh}\}$ pueden ser fácilmente derivados. A pesar de que δ_{ijkh} parece tener una alta dimensión, el hecho de que $\delta_{ijkh} = 0$ para $h \neq m_{ij}$ puede ser usado para reducir los requerimientos de memoria. Ver figura 5 para un ejemplo y figura 6 para su planeación.

Operación	Tiempo de procesamiento	Tipo de máquina
1	3	2
Tiempo fuera	2	--
2	2	1

Peso = 1
Fecha de entrega = 9

Fig. 5.- Orden de Trabajo para el trabajo *i*.



Operación (i,1) usa la máquina 2 desde tiempo 3 hasta el tiempo 5: $\delta_{i132} = \delta_{i142} = \delta_{i152} = 1$

Operación (i,2) usa la máquina 1 desde el tiempo 9 hasta el tiempo 10: $\delta_{i291} = \delta_{i2,10,1} = 1$

Todos los demás δ son cero. $T_i = c_{i2} - D_i = 10 - 9 = 1$

Fig. 6.- Un trabajo programado.

La función de costo a ser minimizada es una función de retardo de los trabajos elevada al cuadrado.

$$J \equiv \Sigma_i w_i T_i^2 \tag{1}$$

Esta función objetivo de retraso tiene validez para los valores de los trabajos, la importancia de reunir las fechas entrega y el hecho de que un trabajo se vuelve más crítico con cada unidad de tiempo que pasa después de su fecha de entrega[7].

[7] Luh *et al.* Ref. 27 used the sum of weighted tardiness rather than weighted quadratic tardiness. For the weighted tardiness function, the incremental penalty of a job does not change as the tardiness increases. Thus, for example, for two jobs with weight one, both jobs one day late (objective function *J=2*) is equivalent to one job two days late (*J=2*). The weighted quadratic tardiness function resolves this ambiguity. Here, two jobs one day late has lower cost (*J=2*) than the situation of one job being two days late (*J=4*).

La investigación en la planeación práctica ha mostrado que este objetivo está próximo a ser más útil que a decir del criterio Makespan en los sistemas de manufactura actuales (Ref. 6). Además, la aditividad de la función de costo facilita el acercamiento a la descomposición.

Ahora un problema de planeación estático y determinístico puede ser formulado como sigue:

$$P : \min_{\{bij\},\{mij\}} J, \quad \text{con} \quad J \equiv \Sigma_i w_i T_i^2 \tag{2}$$

Sujeto a las restricciones de precedencia:

$$c_{ij} + S_{ijl} + 1 \leq b_{il} \quad (i = 1, 2, ...N;\ j = 1, 2, ...N_i - 1;\ l \epsilon I_{ij} \tag{3}$$

Restricciones de capacidad:

$$\Sigma_{ij}\, \delta_{ijkh} \leq M_{kh} \quad (k = 1, 2, ...K\ ;\ h = 1, 2, ..., H) \tag{4}$$

Y requerimientos de tiempo de procesamiento:

$$c_{ij} - b_{ij} + 1 = t_{ijm_{ij}}, \quad (i = 1, 2, ...N;\ j = 1, 2, ...N_i) \tag{5}$$

Como se notó en la sección 3.3.2, esta formulación del problema es similar a aquella de (Ref. 20), excepto aquellas restricciones de capacidad (4) considera diferentes tipos de máquinas, las restricciones de precedencia (3) ya no son restringidas al tipo simple rama / junta, y la restricción (5) refleja el hecho de que la operación $(i\ ,\ j)$ puede ser procesada en unos cuántos tipos de máquinas con diferentes requerimientos de tiempo de proceso (i.e., simple ruta para operaciones).

3.3.2 METODOLOGÍA DE SOLUCIÓN.

La complejidad del problema de programación motiva a una aproximación a la descomposición. La relajación lagrangiana (LR – Lagrangian relaxation) ha sido usada para relajar las restricciones de capacidad en (Ref. 27 y 20) para alcanzar una descomposición del problema de programación por trabajo. En el último documento, una función de costo es calculada para cada posible combinación de los tiempos de inicio de la operación de un trabajo. La complejidad computacional en la programación de un trabajo es así una función exponencial del número de operaciones del trabajo. En este documento, un trabajo puede sostener un gran número de operaciones, de tal forma que la aproximación de (Ref. 20) es poco práctica. Se determinó que ambas constantes la de precedencia y la de capacidad pueden ser relajadas a través del uso de multiplicadores de Lagrange. Esto lleva a complicaciones adicionales, lo cual será explicado en detalle conforme ocurra y se concentra al final de esta sección.

A. La aproximación de la relajación lagrangiana.

Las restricciones de capacidad (4) pueden ser relajadas usando los multiplicadores de Lagrange no negativos π_{kh}, y las restricciones de precedencia (3) pueden ser relajadas usando los multiplicadores de Lagrange no negativos λ_{ijl}.

$$\min_{\{b_{ij}\},\{m_{ij}\}} \left\{\sum_i \left\{w_i T_i^2 + \sum_{j,l\in I_{ij}} \left[\lambda_{ijl}(b_{ij} + t_{ijm_{ij}} + S_{ijl} - b_{il})\right] + \sum_{kh} \pi_{kh}(\sum_{ij} \delta_{ijkh} - M_{kh})\lambda\right\}\right\} \tag{6}$$

sujeta a (5).

La doble Lagrangiana al problema P es:

$$\max_{\pi,\lambda\geq 0}\left\{-\sum_{kh}\pi_{kh}M_{kh} + \sum_i \min_{\{b_{ij}\},\{m_{ij}\}}\left\{w_i T_i^2 + \sum_j\left[\sum_{l\in I_{ij}}\lambda_{ijl}(b_{ij} + t_{ijm_{ij}} + S_{ijl} - b_{il}) + \sum_{k=b_{ij}}^{c_{ij}}\pi_{km_{ij}}\right]\right\}\right\} \tag{7}$$

Donde el hecho de que $\delta_{ijkh} = 0$ para todo $h \neq m_{ij}$ ha sido usado.

La operación de minimización en (6) ha sido llevada adentro de la sumatoria por qué el mínimo de la suma es la suma de los mínimos cuando los trabajos son independientes. Ésto resulta en una minimización de un sub-problema para cada trabajo:

$$\min_{\{b_{ij}\},\{m_{ij}\}}\left\{w_i T_i^2 + \sum_j\left[\sum_{l\in I_{ij}}\lambda_{ijl}(b_{ij} + t_{ijm_{ij}} + S_{ijl}) - \sum_{l:j\in I_{il}}\lambda_{ilj}b_{ij} + \sum_{b_{ij}}^{c_{ij}}\pi_{,m_{ij}}\right]\right\} \tag{8}$$

Para una operación particular y un tipo de máquina particular $h\epsilon H_{ij}$, (8) todavía puede ser descompuesta al siguiente nivel de operación de los sub-problemas:

$$\min_{\{1\leq b_{ij}\leq K\}}\left\{w_i T_i^2 \Delta_{jN_i} + \left[\sum_{l\in I_{ij}}\lambda_{ijl} - \sum_{l:j\in I_{il}}\lambda_{ilj}\right]b_{ij} + \sum_{b_{ij}}^{c_{ij}}\pi_{kh}\right\} \tag{9}$$

Donde $\Delta_{jNi} = 1$ si j es la última operación del trabajo y 0 de otra manera, y t_{ijh} y S_{ijl} son constantes que no impactan el proceso de selección de tiempo de inicio.

El desarrollo (6)-(9) sigue la metodología desarrollada en (Ref. 27) e incluye la relajación de las restricciones de precedencia. El sub-problema del nivel de operación de (9) es numeralmente resuelto para cada tipo de máquina candidata H_{ij}. El tiempo de inicio y el tipo de máquina asociado con el costo más pequeño es seleccionado entonces y utilizado para actualizar los multiplicadores a ser discutidos en la sub-sección 3.3.4-D . La selección de b_{ij}, sin embargo, depende fuertemente del signo de $(\sum_{l\in I_{ij}}\lambda_{ijl} - \sum_{l:j\in I_{il}}\lambda_{ilj})$ lo cual es una constante para este sub-

problema de nivel de operación. El resultado es que b_{ij} es muy grande cuando este termino es negativo y muy pequeño cuando es positivo. Para una operación restringida por operaciones precedentes y subsecuentes, ni el resultado es aceptable desde que un tiempo de inicio pequeño se traslapa con operaciones precedentes y un tiempo de inicio largo se traslapa con operaciones posteriores. La solución de oscilación entre tiempos de inicio pequeños y largos también lleva a oscilaciones en valores de los multiplicadores, haciendo convergencia a cualquier dificultad de multiplicadores significantes. Por esta razón, se utilizaron los términos de penalización al cuadrado para agregar el sintonizado fino necesario para balancear programación inicial y final y cubrir todas las operaciones juntas de un trabajo.

B. La aproximación de la relajación lagrangiana aumentada.

El método de la relajación lagrangiana aumentada (o el método del multiplicador) ha sido aplicado generalmente a problemas de variable continua con una gran posibilidad de éxito. Básicamente la relajación lagrangiana aumentada es la relajación lagrangiana regular con términos de penalización de restricción-relativa agregados a la función de costo. La idea es agregar un término a la función objetivo que incluye un alto costo por la violación de las restricciones. Asociado con el método está un coeficiente de penalización que determina la severidad de la pena. Conforme se incrementa este coeficiente, la solución del problema de relajación lagrangiana se aproxima a la solución original del problema (Ref. 26). Bertsekas (Ref. 4) reporta rápida convergencia cuando los términos de penalización se agregan a la función de costo LR. Hasta nuestro conocimiento, el método no se ha aplicado previamente a problemas de programación de taller (job-shop).

$$D: \max_{\pi,\, \lambda \geq 0} q(\pi,\lambda)$$

con

$$q(\pi,\lambda) \equiv \min_{\{b_{ij}\},\, \{m_{ij}\},\, \{s_{ijl}\}} L =$$

$$\left\{ -\Sigma_{hk}\, \pi_{kh} M_{kh} + \Sigma_i \min_{\{b_{ij}\},\, \{m_{ij}\},\, \{s_{ijl}\}} \left\{ w_i T_i^2 + \Sigma_j \left[\Sigma_{l \in I_{ij}} \left[\lambda_{ijl} (b_{ij} + t_{ijm_{ij}} + s_{ijl} - b_{il}) + \frac{p_{ijl}}{2} (b_{ij} + t_{ijm_{ij}} + s_{ijl} - b_{il})^2 \right] + \Sigma_{b_{ij}}^{c_{ij}} \pi_{k,m_{ij}} \right] \right\} \right\} \quad (12)$$

Con el fin de aplicar el método, la restricción de desigualdad de precedencia (3) se convierte a la siguiente restricción de igualdad utilizando una variable de reducción s_{ijl}:

$$b_{ij} + t_{ijm_{ij}} + s_{ijl} = b_{il} \qquad (i = 1,2,\ldots,N;\ j = 1,2,\ldots,N_i - 1;\ l \in I_{ij}) \quad (10)$$

donde (5) ha sido utilizada para sustituir a c_{ij}. La variable de reducción s_{ijl} es el tiempo entre operaciones y se convierte en una variable de decisión con el requerimiento que $s_{ijl} \geq S_{ijl}$. Se

forma entonces un termino de penalización utilizando la restricción de igualdad anterior, con el coeficiente de penalización p_{ijl}. Esto conduce al siguiente problema relajado:

$$R: \quad \min_{\{b_{ij}\},\{m_{ij}\},\{s_{ijl}\}} \quad L$$

con

$$L \equiv \left\{ \sum_i \left\{ w_i T_i^2 + \sum_{j,l \in I_{ij}} \left[\lambda_{ijl}(b_{ij} + t_{ijm_{ij}} + s_{ijl} - b_{il}) + \frac{p_{ijl}}{2}(b_{ij} + t_{ijm_{ij}} + s_{ijl} - b_{il})^2 \right] \right\} + \sum_{ij} \sum_{k=b_{ij}}^{c_{ij}} \pi_{km_{ij}} - \sum_{kh} \pi_{kh} M_{kh} \right\} \tag{11}$$

El método multiplicador manda que p_{ijl} sea positivo y no disminuya durante el curso de la optimización. La doble Lagrangiana al problema P esta dada por (12). En la derivación (12) la operación de minimización en (11) se ha llevado nuevamente adentro de la sumatoria porque los trabajos son independientes. Esto resulta en un sub-problema de minimización para cada trabajo:

$$R_i: \quad \min_{\{b_{ij}\},\{m_{ij}\},\{s_{ijl}\}} \quad L_i$$

$$L_i \equiv \left\{ w_i T_i^2 + \sum_j \left[\sum_{l \in I_{ij}} \left[\lambda_{ijl}(b_{ij} + t_{ijm_{ij}} + s_{ijl}) + \frac{p_{ijl}}{2}(b_{ij} + t_{ijm_{ij}} + s_{ijl} - b_{il})^2 \right] - \sum_{l:\, j \in I_{il}} \lambda_{ilj} b_{ij} + \sum_{b_{ij}}^{c_{ij}} \pi_{k,m_{ij}} \right] \right\} \tag{13}$$

En este punto, además de la descomposición a sub-problemas de nivel operación se requiere más análisis. En (9), la selección de b_{ij} fue independiente a cualquier otro tiempo de inicio de operación del trabajo i. En (13), sin embargo, un termino cruzado involucrando a ambas b_{ij} y b_{il} se deriva de una función de penalización cuadrada. La selección de b_{ij} depende además de la solución de otras ecuaciones y viceversa, y cualquier mínimo global requiere de un procedimiento de numeración como (Ref. 20). Desde que esto no es práctico, la sub-sección siguiente describe una aproximación de descomposición forzada designada para obtener un buen programa para lo que puede ser un problema dimensionable.

C. Programando operaciones individuales.

En el primer paso buscando la descomposición del problema (13), todos los términos involucrando b_{ij} son recolectados. Eso consiste de lo siguiente:

$$w_i T_i^2 \Delta_{jN_i} + \sum_{l \in I_{ij}} \left[\lambda_{ijl}(b_{ij} + t_{ijh} + s_{ijl} - b_{il}) + \frac{p_{ijl}}{2}(b_{ij} + t_{ijh} + s_{ijl} - b_{il})^2 \right] +$$
$$\sum_{l,j \in I_{il}} \left[\frac{p_{ilj}}{2}(b_{il} + t_{ilm_{il}} + s_{ilj} - b_{ij})^2 + \lambda_{ilj}(b_{il} + t_{ilm_{il}} + s_{ilj} - b_{ij}) \right] + \sum_{k=b_{ij}}^{c_{ij}} \pi_{kh} \qquad (14)$$

donde $\Delta_{jN_i} = 1$ si j es la ultima operación del trabajo y 0 si es de otra forma. Note que dos términos se derivan de la interacción con operaciones previas y dos de la interacción con operaciones posteriores. La aproximación iterativa de Gauss-Seidel (Ref. 28) se adopta para vencer esta interdependencia. Una iteración de Gauss-Seidel para un trabajo, consiste en resolver todos los sub-problemas de nivel operación desde la primera hasta la última operación del trabajo. El comienzo de los tiempos de inicio pueden ser las fechas de comienzo más tempranas de todas las operaciones, considerando los tiempos de proceso y tiempos fuera requeridos. En la solución de un sub-problema particular relacionado a la operación (i,j), las últimas disponibles $\{b_{il}\}$ son usadas y se manejan como constantes. Debido a que las operaciones son resueltas en un orden particular, los tiempos de inicio de todas las operaciones precedentes ($l < j$) se han resuelto en la iteración actual de Gauss-Seidel, mientras que los tiempos de inicio de todas las operaciones subsecuentes ($l > j$) se toman de todas las iteraciones previas (o inicialización si esta es la primera iteración). Al final de la iteración de Gauss-Seidel, si las soluciones de la iteración actual son iguales a las de la iteración previa, se dice que el Gauss-Seidel ha convergido. De otra manera, los tiempos de inicio de las operaciones obtenidos se utilizan para comenzar con la siguiente iteración de Gauss-Seidel. Si no se obtiene la convergencia después de cierto número de fijo de iteraciones , se utiliza la solución que genera el menor costo. Sin embargo, si el Gauss-Seidel converge o no, el costo generado puede no ser un mínimo global (Ref. 5)[8].

Dejemos que $\bar{b}_{il}$ represente el tiempo de inicio de la operación siguiente (i,l), calculada en la iteración previa. Dados los datos π, λ y hcH_{ij}. la función del costo de operación a ser minimizada es:

$$\bar{R}(ijh): \min_{\{b_{ij}\},\{s_{ijl}\}} \bar{L}_{ijh}$$

con

$$\bar{L}_{ijh} \equiv w_i T_i^2 \Delta_{jN_i} + \sum_{l \in I_{ij}} \left[\lambda_{ijl}(b_{ij} + t_{ijh} + s_{ijl} - \bar{b}_{il}) + \frac{p_{ijl}}{2}(b_{ij} + t_{ijh} + s_{ijl} - \bar{b}_{il})^2 \right]$$
$$+ \sum_{l,j \in I_{il}} \left[\frac{p_{ilj}}{2}(b_{il} + t_{ilm_{il}} + s_{ilj} - b_{ij})^2 + \lambda_{ilj}(b_{il} + t_{ilm_{il}} + s_{ilj} - b_{ij}) \right] + \sum_{k=b_{ij}}^{c_{ij}} \pi_{kh} \qquad (15)$$

[8] If the function is convex and continuous, the Gauss-Seidel iterative technique is guaranteed to converge to an optimal solution (ref. 5). No convergence result can be found for the class of problems considered here.

Para determinar el s_{ijl} que da el mínimo valor de (15), notamos primeramente que $\bar{L}_{ijh}$ en (15) esta al cuadrado con respecto a s_{ijl}. Dada b_{ij}, se puede ver que $s_{ijl} = \max[S_{ijl}, s^r_{ijl}]$ donde s^r_{ijl} es el valor entero redondeado de $\left[\bar{b}_{il} - (b_{ij} + t_{ijm} + \lambda_{ijl}/p_{ijl})\right]$. Del mismo modo, $s_{ilj} = \max[S_{ilj}, s^r_{ilj}]$. Las variables b_{ij} se obtienen entonces enumerando los tiempos de inicio desde 1 hasta el tiempo horizonte K para cada tipo posible de máquina $h \epsilon H_{ij}$ y comparando directamente los valores de $\bar{L}_{ijh}$ derivados de cada posibilidad. El tipo de máquina que genera la solución más pequeña se define como m_{ij}, y su costo es $\bar{L}_{ijm_{ij}}$, o simplemente $\bar{L}_{ij}$. La complejidad para obtener el tiempo de inicio y el tipo de máquina para cada operación para cada operación para una iteración Gauss-Seidel es $O(K^*|H_{ij}|)$, donde $|H_{ij}|$ es la cardinalidad de H_{ij}. Note que si un trabajo no está disponible hasta un tiempo de inicio más temprano, este proceso de numeración comienza en el tiempo de inicio más temprano más bien que en el tiempo 1.

Los costos generados por la solución de (15) se suman todos juntos para obtener el costo del sub-problema de la tarea (13). Podemos observar que, debido a que se forma la ruta de (14), los términos de las restricciones de precedencia se cuentan doblemente. Además, la suma de $\bar{L}_{ij}$ debe ser ajustado a la forma $\bar{L}_i$ como sigue:

$$\bar{L}_i = \sum_j \left\{ \begin{array}{l} \bar{L}_{ij} - \sum_{l \epsilon I_{ij}} \left[\frac{p_{ijl}}{4}(b_{ij} + t_{ijm_{ij}} + s_{ijl} - \bar{b}_{il})^2 + \frac{\lambda_{ijl}}{2}(b_{ij} + t_{ijm_{ij}} + s_{ijl} - \bar{b}_{il}) \right] \\ - \sum_{l: j \epsilon I_{il}} \left[\frac{p_{ilj}}{4}(b_{il} + t_{ilm_{ij}} + s_{ilj} - \bar{b}_{ij})^2 + \frac{\lambda_{ilj}}{2}(b_{il} + t_{ilm_{il}} + s_{ilj} - b_{ij}) \right] \end{array} \right\} \quad (16)$$

También, desde que la técnica de Gauss-Seidel no puede producir los costos mínimos de operación, el valor $\bar{L}_i$ es una aproximación al costo óptimo del trabajo de (13). Sin embargo, $\bar{L}_i$ es usada para maximizar el costo de la doble Lagrangiana $\bar{q}(\pi, \lambda)$ siguiendo (12):

$$\bar{D}: \max_{\pi, \lambda \geq 0} \bar{q}(\pi, \lambda)$$

con

$$\bar{q}(\pi, \lambda) = \left\{ - \sum_{hk} \pi_{kh} M_{kh} + \sum_i \bar{L}_i \right\} \quad (17)$$

El problema de maximización de (17) será discutido con más detalle en la siguiente sub-sección.

D. Resolviendo el Problema Dual.

Para resolver el problema dual relacionado a (17), se adopta el método de sub-gradiente del trabajo previo (Ref. 20 y 27) para actualizar el multiplicador π, y el método multiplicador (Ref. 4) en actualizar el multiplicador λ y el coeficiente de penalización p. El método del sub-gradiente fue presentado originalmente por Shor (Ref. 34), posteriormente fue explorado por Polyak (Ref. 33), y se usa comúnmente para resolver este tipo de problemas (ver, e.g. Ref. 32). El multiplicador de Lagrange π es actualizado por

$$\pi^{n+1} = \pi^n + \alpha^n g(\pi^n) \tag{18}$$

donde α^n es el tamaño del paso en la iteración enésima, y $g(\pi)$ es el sub-gradiente de $\bar{q}$. El componente sub-gradiente de la máquina tipo h en el tiempo k es igual a $(\sum_{ij} \delta_{ijkh} - M_{hk})$. El tamaño del paso α^n esta dado por

$$\alpha^n = \beta \frac{q^U - \bar{q}^n}{g(\pi^n)^T g(\pi^n)} \tag{19}$$

donde q^U es un estimado de la solución óptima de (17), y $\bar{q}^n$ es el valor de $\bar{q}$ en la enésima iteración. Los parámetros β y q^U son cambiados adaptándose conforme el algoritmo converge, con el rango de cambio determinado por experiencias de medición (vea también Ref. 33). Esto ha sido mostrado generalmente para mejorar la convergencia del algoritmo de sub-gradiente (vea Ref. 13). En particular, si el valor de $\bar{q}^n$ sigue siendo el mismo después de muchas iteraciones, los valores del parámetro son disminuidos. El número de iteraciones antes del descenso y el porcentaje de descenso son los valores a seleccionar o a "afinar". Desde que los datos de entrada pueden cambiar muy poco de un día a otro en la situación de la programación de la manufactura, "afinar" estos parámetros es realmente una tarea obligatoria.

El otro multiplicador de Lagrange λ es ajustado de acuerdo a la fórmula del método del multiplicador (Ref. 4)

$$\lambda^{n+1} = \lambda^n + p^n g(\lambda^n) \tag{20}$$

donde p^n es el coeficiente de penalización en la enésima iteración, y $g(\lambda)$ es el sub-gradiente de $\bar{q}$ con respecto a λ. El componente del sub-gradiente relacionado a la j-ésima operación de la l-ésima operación del trabajo i es $(b_{ij} + t_{ijm_{ij}} + s_{ijl} - b_{il})$. El coeficiente de penalización p_{ijl} es multiplicado periódicamente por un factor γ (cada cinco o diez iteraciones) si el componente del sub-gradiente $g(\lambda_{ijl})$ es diferente de cero en esa iteración. El parámetro γ es seleccionado de tal forma que p_{ijl} no decrementa, pero no tan grande que el problema se vuelva ill-condicionado (Bertsekas sugiere $\gamma\varepsilon$ Ref. 4,7 [4, p. 123]).

La calidad de las actualizaciones en (18) y (20) depende de la convergencia de la iteración de Gauss-Seidel de (15). Como se mencionó anteriormente el método de Gauss-Siedel no está garantizado para converger al óptimo. La calidad de las actualizaciones está incrementada aplicando una búsqueda lineal limitada de tipo Armijo para los mejores valores actualizados de π y λ. Los multiplicadores que generan el valor de la función mas larga $\bar{q}$ se eligen como los actualizados. El algoritmo se detiene cuando se alcanza un número fijo de iteraciones. Los resultados proveen las bases para la construcción de un programa factible, tema de la siguiente sub-sección.

E. Construcción de un Programa Factible.

Debido a las variables discretas de decisión involucradas en el criterio de paro utilizado, la solución al problema dual generalmente es asociada con un programa no factible, i.e. algunas de las restricciones de precedencia (3) y/o restricciones de capacidad (4) deben violarse. Hay que observar que los requerimientos de tiempo de procesamiento (5) siempre son satisfechos en tanto que los sub-problemas (15) sean resueltos. Para construir un programa factible, la solución dual se modifica primero para asegurar que las restricciones de precedencia son satisfechas. Esto es hecho obligando a todas las b_{ij} a que violen las restricciones de precedencia adelantadas en el tiempo, comenzando con la segunda operación de cada trabajo. Se aplica entonces la aproximación de la lista del programa (Ref. 20). En este procedimiento de lista de programa, se crea una lista arreglando operaciones de todos los trabajos en el orden ascendente de los tiempos de inicio de operación modificados. Las operaciones son entonces programadas en los tipos de máquina requeridas de acuerdo a esta lista conforme las máquinas están disponibles. Si la restricción de capacidad para un tipo particular de máquina es violada en el tiempo k, un heurístico ambicioso basado en el cambio incremental en J (la función original de costo [1]) determina cuáles han dado la operación que debe comenzar en ése intervalo de tiempo y cuáles deben ser atrasadas por una unidad de tiempo. Las operaciones subsecuentes de las atrasadas son entonces atrasadas por una unidad de tiempo si las restricciones de precedencia son violadas. El proceso entonces se repite.

3.3.3 EVALUACIÓN DE FUNCIONAMIENTO.

A. Una Formulación de un Problema Relacionado.

Desde que la técnica de Gauss-Seidel no puede producir los costos mínimos del nivel de operación, el valor de la función dual $\bar{q}$ en (17) no puede ser un enlace inferior en el costo óptimo. Para evaluar el programa, se emplea una formulación del problema ligeramente diferente. Cuando la relajación lagrangiana se aplica a la formulación de este problema, se puede obtener un enlace inferior efectivo en el costo óptimo. Para explicar mejor la técnica, se introducen las siguientes variables adicionales:

w_{ijlk} variable entera igual a 1 para cada unidad de tiempo $k \le c_{ij} + S_{ijl}, l \in I_{ij}$, y cero de alguna otra manera;

σ_{ijk} variable entera igual a 1 para cada unidad de tiempo $k \ge b_{ij}$. y cero en caso de otra cosa.

Con estas nuevas variables, las restricciones de precedencia (3) se pueden reemplazar por lo siguiente:

$$w_{ijlk} + \sigma_{ilk} \le 1 \qquad (i=1, ...,N; \quad j=1, ..., N_i; \quad k=1, ..., K; \; l \in I_{ij}) \tag{21}$$

Hay que observar que w_{ijlk} es 1 para cada unidad de tiempo menor a $c_{ij} + S_{ijl}$, y σ_{ilk} es 1 para cada unidad de tiempo mayor a b_{il}. Además, la restricción (21) es satisfecha sí y sólo sí la operación subsecuente (i,l) no comienza hasta que la operación actual (i,j) y el tiempo de paro requerido sean completados.

Con la restricción (21) en lugar de la (3), la formulación del problema permanece válida, y la relajación lagrangiana puede ser aplicada. La desventaja de esta aproximación, sin embargo, es que el grupo de multiplicadores lagrangianos que relajan a (21) tiene dimensiones extremadamente altas. Es, además, muy difícil resolver el problema de programación basado solamente en este problema de formulación. La idea es usar este problema de formulación después de resolver el problema dual de la sección 3.3.4, y usar los multiplicadores π obtenidos aquí. Se ha mostrado, que para problemas de programación convexos, los multiplicadores óptimos de Lagrange del procedimiento lagrangiano aumentado tiene los mismos valores como en LR (Ref. 4, p. 322). A pesar de que se han encontrado resultados no correspondientes para problemas de programación entera, los multiplicadores π obtenidos de la sección 3.3.4 son utilizados para evitar problemas computacionales. Con π fijado, los multiplicadores asociados con (21) se pueden obtener en una forma juiciosa, y los costos duales proveen un enlace inferior en el costo óptimo. Los multiplicadores π también se pueden actualizar unas cuantas veces para mejorar el enlace inferior utilizando el método del sub-gradiente, aun así, los multiplicadores de Lagrange asociados con (21) deben ser reiniciados cada vez si no hay disponible memoria adecuada.

B. Evaluación de la solución posible a través del Gap de la Dualidad Aproximada.

Una vez que se obtiene un programa factible, el valor correspondiente a la función objetiva J es un enlace superior en el objetivo óptimo J^*. El valor de la función dual $q^*(\mu, \pi)$ basado en (21) es un enlace inferior en J^* (Ref. 18). La diferencia entre J^* y q^* es conocida como el gap de la dualidad. Una liga superior del gap de la dualidad se provee por $J - q^*$, lo cual es una medida de la sub-optimización del programa factible. Los gaps aproximados y relativos $(J - q^*)/ q^*$ de la dualidad para los ejemplos en la siguiente sección son menos de 10%. Esto es algo mayor que los resultados de las máquinas paralelas reportados en (Ref. 20 y 27), desde que el problema actual es mucho más complicado.

C. Estructura general del algoritmo.

La estructura general del algoritmo se presenta en la Fig. 7. Los bloques básicos de construcción son los métodos del sub-gradiente y del multiplicador para actualizar los multiplicadores y los coeficientes de penalización; la técnica iterativa de Gauss-Seidel para resolver sub-problemas de nivel de operación, el método de lista de programación para generar un programa factible, y la metodología de evaluación con problemas duales de relación de trabajo se discuten en la sección V. Los multiplicadores, coeficientes de penalización, y tiempos de inicio de todas las operaciones deben ser inicializados. En la siguiente sección, la metodología es ilustrada a través de ejemplos donde se dan las inicializaciones utilizadas para resolver cada problema. El último ejemplo muestra el uso día-a-día del algoritmo para un taller actual sobre un periodo de tres semanas.

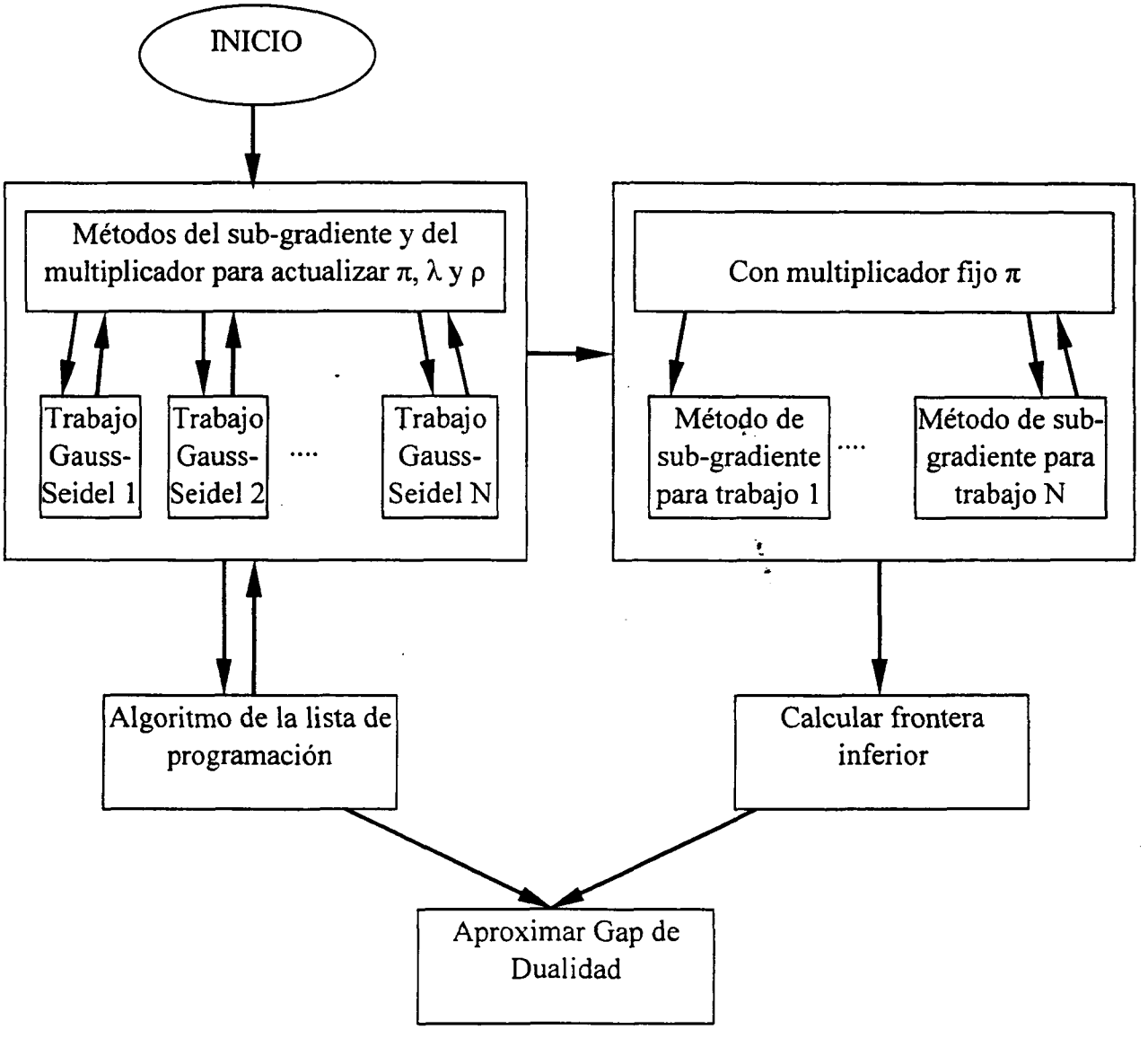


Fig. 7.- Un esquema del algoritmo.

A. Ejemplo 1

En el primer ejemplo, hay tres diferentes máquinas y cuatro trabajos con la misma importancia o peso ($w_i = 1$). El horizonte de planeación es 25 días (i.e. $K = 25$, y la unidad de tiempo es el día). Todas las máquinas están disponibles en el día uno y a lo largo del horizonte de planeación. Todos los trabajos están disponibles para procesarse en el día uno, pero hay entregas el día cero. Cada trabajo está compuesto de tres operaciones en serie a ser procesadas en tres máquinas sin tiempos muertos requeridos entre operaciones. Los datos se muestran en la tabla 8.

Todos los multiplicadores fueron inicializados en cero, y todos los coeficientes de penalización p fueron inic[illegible]plicados cada 5 iteraciones si la restricción precedente asociada fue violada en la quinta iteración. La liga inferior se obtiene en 469.7, y el programa factible tiene un costo J=475.0 con un gap relativo de dualidad de 1.13%; este costo es realmente óptimo. El programa resultante se muestra en una tabla de Gantt en la tabla 9. El tiempo para resolver el problema es de 12.7 segundos en una computadora Mainframe de IBM. Hay que señalar que si muchos trabajos nuevos estuvieran por llegar después de que este programa ha sido generado, los multiplicadores actuales y los coeficientes de penalización se pueden utilizar para iniciar el proceso de reprogramación. Esto ha sido mostrado generalmente para reducir el tiempo de cálculo comparado con el caso en el que todos los multiplicadores son iniciados en cero (vea Ref. 20 y 27).

Job i	Op. j	Mach. h	t_{ij}	I_{ij}
1	1	1	4	—
	2	2	3	1
	3	3	2	2
2	1	2	1	—
	2	1	4	1
	3	3	4	2
3	1	3	3	—
	2	2	2	1
	3	1	3	2
4	1	2	3	—
	2	3	3	1
	3	1	1	2

Tabla 8.- Datos para el ejemplo 1.

Time	1	2	3	4	5	6	7
Machine 1	1,1*	1,1	1,1	1,1	2,2	2,2	2,2
Machine 2	4,1	4,1	4,1	2,1	1,2	1,2	1,2
Machine 3	3,1	3,1	3,1	4,2	4,2	4,2	
Time	8	9	10	11	12	13	
Machine 1	2,2	4,3	3,3	3,3	3,3		
Machine 2	3,2	3,2					
Machine 3	1,3	1,3	2,3	2,3	2,3	2,3	

*The notation "i,j" refers to operation j of the job i

Tabla 9.- Diagrama de Gantt del programa para el ejemplo 1

B. Ejemplo 2

Este ejemplo presenta datos del taller de desarrollo de operaciones de Pratt & Whitney. Los datos provienen de alrededor de veinte centros de trabajo relacionados con máquinas de control numérico (NC). Hay un total de 32 tipos de máquinas y todas ellas son diferentes. Hay 228 trabajos, cada uno de ellos consiste desde una hasta siete operaciones, para un total de 335 operaciones. Una operación se puede realizar en una o en un juego de máquinas diferentes, con el número de tipos de máquinas elegibles variando desde una hasta seis. Los tiempos muertos requeridos de longitudes variables también existen en algunas operaciones. Los trabajos son caracterizados por diferentes tiempos de entrega y pueden tener uno de cinco tipos diferentes de pesos. El horizonte planeado es de 414 días de trabajo, o alrededor de 1.5 años. No todas las máquinas están disponibles inmediatamente debido a que algunas de ellas están ocupadas procesando trabajos que ya comenzaron.

Estos trabajos son programados actualmente usando un programador basado en conocimiento en Pratt & Whitney. El programador basado en conocimiento opera interactivamente con personas. El programador para el grupo de máquinas NC tenía años de experiencia como un programador en el taller y una cantidad significativa de experiencia en el uso del programador interactivo. De esta forma se comparan los resultados con el programa actual.

Todos los multiplicadores y los coeficientes de penalización se inicializaron y se ajustaron como se describe en el ejemplo 1. La frontera inferior se obtiene en 4,634,114. 6 y el programa factible tiene un costo J = 4,981,197. 5 con un gap de dualidad relativa 7. 49%. El tiempo para resolver el problema es de 7.44 minutos CPU en una computadora mainframe IBM 3090. El programa existente generado por el otro programador fue evaluado en 6,504,614. 5, lo cual es 40. 36% más allá del límite inferior.

C. Ejemplo 3

Como un tercer ejemplo, el grupo de máquinas NC en el taller de desarrollo de operaciones fue programado para un periodo de tres semanas en la primavera de 1991, el programa fue actualizado para reflejar la llegada y salida de trabajos en la última información correspondiente a los planes de proceso y los tiempos de procesamiento. Con cada reconfiguración del programa, los multiplicadores de los programas previos son utilizados para inicializar el algoritmo. Los resultados se muestran en la tabla 10.

El tamaño del problema es M x N, donde M es el número de tipos de máquinas y N es el número de trabajos. Aquí, M varía ligeramente porque sólo aquellas máquinas requeridas para los trabajos fueron incluidas en el problema. El tiempo horizonte K es 300 días en cada caso. Como en el ejemplo 2, cada tipo de máquina tiene una máquina. cada parte puede tener hasta un máximo de siete operaciones, y cada operación puede ser realizada en uno de muchos tipos diferentes de máquinas (hasta seis). Los datos y el programa para mayo 3 de 1991 se presentan en la tabla 4.

Día a día la programación se lleva cabo inicializando los multiplicadores π, λ, y los coeficientes de penalización p se basan en valores del programa previo. Los coeficientes de penalización p fueron disminuidos a la mitad en el inicio he incrementados subsecuentemente de acuerdo a la estrategia discutida en el ejemplo 1. Los tiempos de inicio fueron inicializados usando un programa de respaldo a partir de la fecha de entrega o utilizando programación futura desde hoy si la fecha de entrega no se podía cumplir. La calidad consistente próxima a lo óptimo de los programas se muestra por el hecho de que todos los programas están dentro del cinco por ciento, mientras que la calidad de los programas generados por el sistema basado en conocimiento está entre el 15 y 20% más allá del límite inferior (tercera columna de la tabla 3). El tiempo de cómputo se ha mejorado también significativamente a partir del ejemplo 2, desde que los multiplicadores y los coeficientes de penalización fueron inicializados basados en resultados de los programas previos.

Tabla 10.- Generación del programa y re-configuración para máquinas de NC.

Date	Problem Size	Cost, Existing Schedule	Cost, Our Schedule	Lower Bound	Relative* Difference (%)	CPU** Time
4/17	32×126	304589.0	274735.5	264488.0	3.9	2.6
4/19	32×143	305990.0	278108.5	267093.8	4.1	2.8
4/22	34×141	307934.0	280746.0	271100.4	3.6	2.9
4/24***	33×133	564532.0	531851.0	531203.2	0.1	3.0
4/26	32×135	296671.0	268827.5	266665.0	0.8	2.8
4/29	32×128	298825.5	268504.5	266122.0	0.9	2.2
5/1	32×124	303477.5	270584.5	267442.3	1.2	2.3
5/3	33×127	282516.0	247843.5	243192.0	1.9	2.1

*Relative difference refers to relative difference between our schedule cost and the lower bound.

**CPU time is in minutes, and was performed on an IBM 3090 mainframe computer.

***A few single-operation, high priority tardy jobs arrived on this day, which temporarily drove up the schedule cost. Since these operations immediately went into processing, the schedule cost returns to normal on 4/26.

Tabla 11.- Datos para máquinas NC / programa de mayo 3, 1991.

(Time horizon: 300. Number of machine types: 33. Number of jobs: 124. All jobs denoted with an asterisk have weights of 0.5; otherwise, the job has a weight of 1.0.)

Job No.	Due Date	Rte. No.	Process Time	Earliest Start Date	Start	Mach.	Other Machines Eligible to Perform Operation				
1	10	1	1	1	7	1					
2	10	1	1	1	6	1					
3	9	1	3	1	11	1					
4	61	1	3	2	36	2	3	4	5	6	
5	61	1	3	2	33	2	3	4	5	6	
6	-3	1	3	2	33	2	3	4	5	6	
7*	-85	1	2	1	1	9					
		2	4	5	5	10					
		3	2	11	11	10					
8*	10	1	1	9	9	11	12	13	14		
9	18	1	1	49	49	15					
10	145	1	4	49	56	15					
		2	2	53	60	10					
		3	1	101	135	15					
11	145	1	4	49	52	15					
		2	2	53	56	10					
		3	1	101	134	15					
12	-169	1	28	78	78	15					
		2	3	156	156	16					
13	-114	1	1	14	14	18	19	20	21	22	23
14	-123	1	1	14	14	22	18	19	20	21	23
15	91	1	1	18	27	2	3	4	5	6	
		2	1	20	46	2					
		3	1	24	50	5	2	4	5	6	
16	91	1	1	18	26	2	3	4	5	6	
		2	1	20	32	2	3	4	5	6	
		3	1	24	36	3	2	4	5	6	
17	91	1	1	18	25	2	3	4	5	6	
		2	1	20	31	2	3	4	5	6	
		3	1	24	35	3	2	4	5	6	
18	91	1	1	18	20	2	3	4	5	6	
		2	1	20	30	2	3	4	5	6	
		3	1	24	34	3	2	4	5	6	
19	91	1	1	18	19	2	3	4	5	6	
		2	1	20	29	2	3	4	5	6	
		3	1	24	33	3	2	4	5	6	
20	91	1	1	18	18	2	3	4	5	6	
		2	1	20	28	2	3	4	5	6	
		3	1	24	32	3	2	4	5	6	
21	-65	1	1	1	1	4	2	3	5	6	
		2	1	3	3	6	2	3	4	5	
		3	2	6	6	5	2	3	4	6	
22	-51	1	1	1	1	2	3	4	5	6	
		2	1	3	3	2	3	4	5	6	
		3	2	6	6	2	3	4	5	6	
23	-47	1	1	1	1	5	2	3	4	6	
24	-35	1	1	2	2	24					
25*	2	1	2	1	1	25	26	27	28	29	
26	6	1	2	1	4	2	3	4	5	6	
27	-47	1	28	78	106	15					
		2	3	156	184	16					
28	38	1	1	68	69	1					
29	38	1	1	68	68	1					
30	161	1	1	77	119	1					
31	-45	1	1	1	1	15					
32	-53	1	10	18	18	9					
33	37	1	2	41	41	19	18	20	21	22	23
		2	2	67	69	30					
34	37	1	2	41	41	18	19	20	21	22	23
		2	2	67	67	30					
35	159	1	2	41	85	18	19	20	21	22	23
		2	2	67	134	30					
36	8	1	14	2	2	21	18	19	20	22	23
37	12	1	7	2	4	18	19	20	21	22	23
38	20	1	7	2	12	19	18	20	21	22	23
39	40	1	7	2	19	18	19	20	21	22	23
40	62	1	7	2	43	18	19	20	21	22	23
41	84	1	7	2	57	18	19	20	21	22	23
42	35	1	2	38	38	18	19	20	21	22	23
43	35	1	2	38	38	22	18	19	20	21	23
44	157	1	2	18	87	18	19	20	21	22	23
45	157	1	2	23	89	18	19	20	21	22	23
46	157	1	2	92	126	18	19	20	21	22	23
47	157	1	2	92	124	18	19	20	21	22	23
48	35	1	2	45	45	23	18	19	20	21	22
49	35	1	2	49	49	23	18	19	20	21	22
50	7	1	2	9	9	23	18	19	20	21	22
51	-53	1	1	1	1	3	2	4	5	6	
52	70	1	7	2	39	2	3	4	5	6	
53	3	1	2	11	1	22	18	19	20	21	23
54	-4	1	2	12	12	18	19	20	21	22	23
55	12	1	1	8	8	20	18	19	21	22	23
56	29	1	4	2	4	9					
		2	3	24	26	22	18	19	20	21	23
57	132	1	13	2	61	32					
58	-22	1	10	18	28	9					
59	13	1	13	1	1	12	11	13	14		
60	-10	1	3	1	1	7	8				
61	12	1	13	5	15	7	8				
62	12	1	13	8	24	8	7				
63	6	1	1	1	3	1					
		2	1	7	9	1					
		3	1	8	10	1					
		4	2	14	16	1					
		5	1	16	18	1					
		6	5	24	26	1					
64*	35	1	2	13	23	16					
65	-81	1	1	16	16	23	18	19	20	21	22
66	37	1	1	9	27	18	19	20	21	22	23
67	37	1	1	9	26	18	19	20	21	22	23
68	71	1	5	3	36	11	12	13	14		
		2	1	8	56	18	19	20	21	22	23
69	88	1	5	3	10	11	12	13	14		
		2	1	8	15	23	18	19	20	21	23
70	18	1	1	51	51	15					
71	8	1	3	26	26	30	31				
		2	1	29	31	1					
72	31	1	1	12	22	28	29				
		2	1	14	28	29	28				
73	35	1	1	12	24	28	29				
		2	1	14	32	29	28				
74	36	1	1	12	26	28	29				
75	39	1	1	12	28	28	29				
		2	1	14	35	29	28				
76	40	1	1	12	30	28	29				
		2	1	14	37	29	28				
7	42	1	1	12	32	28	29				
		2	1	14	39	29	28				
78	44	1	1	12	34	28	29				
		2	1	14	41	29	28				
79	31	1	1	12	21	28	29				
		2	1	14	27	29	28				
80	35	1	1	10	23	28	29				
		2	1	12	31	29	28				
81	36	1	1	11	25	28	29				
		2	1	13	33	29	28				
82	39	1	1	12	27	28	29				
		2	1	14	34	29	28				
83	40	1	1	12	29	28	29				
		2	1	14	36	29	28				
84	42	1	1	11	31	28	29				
		2	1	13	38	29	28				
85	44	1	1	12	33	28	29				
		2	1	14	40	29	28				
86	71	1	1	8	51	18	19	20	21	22	23
87	71	1	1	8	50	18	19	20	21	22	23
88	88	1	1	8	54	18	19	20	21	22	23
89	88	1	1	8	52	18	19	20	21	22	23

Tabla 11.- Datos para máquinas NC / programa de mayo 3, 1991. (Continuación)

TA .....)

(Time horizon: 300. Number of machine types: 33. Number of jobs: 124. All jobs denoted with an asterisk have weights of 0.5; otherwise, the job has a weight of 1.0.)

Job No.	Due Date	Rte. No.	Process Time	Earliest Start Date	Start	Mach.	Other Machines Eligible to Perform Operation				
90	71	1	5	3	31	11	12	13	14		
		2	1	8	53	18	19	20	21	22	23
91	81	1	5	3	3	11	12	13	14		
		2	1	8	8	23	18	19	20	21	22
92	11	1	2	2	6	20	18	19	21	22	23
93	8	1	2	2	4	20	18	19	21	22	23
94	8	1	2	2	6	19	18	20	21	22	23
95	11	1	2	2	8	19	18	20	21	22	23
96	8	1	2	2	4	19	18	20	21	22	23
97	14	1	1	7	11	19	18	20	21	22	23
98	14	1	1	7	10	19	18	20	21	22	23
99	37	1	4	1	21	2	3	4	5	6	
100*	-1	1	2	1	2	5	2	3	4	6	
101*	2	1	2	1	3	3	2	4	5	6	
102*	-4	1	1	1	2	4	2	3	5	6	
103*	4	1	2	1	3	4	2	3	5	6	
104*	7	1	2	1	5	3	2	4	5	6	
105	53	1	1	9	11	18	19	20	21	22	23
		2	4	22	38	9					
106	95	1	1	16	16	18	19	20	21	22	23
		2	4	29	42	9					
107	132	1	1	16	17	18	19	20	21	22	23
		2	4	29	46	9					
108	174	1	1	16	18	18	19	20	21	22	23
		2	4	29	50	9					
109	218	1	1	16	28	18	19	20	21	22	23
		2	4	29	54	9					
110	261	1	1	16	29	18	19	20	21	22	23
		2	4	29	58	9					
111	304	1	1	16	156	18	19	20	21	22	23
		2	4	29	232	9					
112	28	1	2	2	9	9					
		2	1	13	23	23	18	19	20	21	23
113	2	1	1	3	3	19	18	20	21	22	23
114	2	1	1	2	2	19	18	20	21	22	23
115	111	1	1	1	60	2	3	4	5	6	
116	111	1	1	1	59	2	3	4	5	6	
117	-6	1	1	2	2	16					
		2	1	4	4	16					
118	17	1	1	5	15	18	19	20	21	22	23
119	-1	1	1	5	5	23	18	19	20	21	22
120	-27	1	1	1	1	6	2	3	4	5	
121	-6	1	1	1	2	2	3	4	5	6	
122	-6	1	1	1	2	3	2	4	5	6	
123	1	1	1	1	2	6	2	3	4	5	
124*	56	1	1	3	29	16					
125*	78	1	1	1	39	16					
126*	98	1	1	3	50	16					
127	19	1	1	3	11	33					

4. DESARROLLO DEL MODELO.

4.1. ANÁLISIS.

4.1.1 IDENTIFICACIÓN DE LAS FUNCIONES DEL TALLER DE MANTENIMIENTO DE MOLDES DE INYECCIÓN.

Las metas principales que busca el taller de mantenimiento de moldes de inyección en orden de importancia son:

1.- Mantener trabajando a 52 máquinas de inyección de plástico que utilizan los moldes de los que el taller es responsable.

2.- Dar el servicio de *mantenimiento preventivo* a los moldes de inyección de plástico, troqueles y dispositivos (de inspección o ensamble).

3.- Dar el servicio de *mantenimiento correctivo* a los moldes de inyección de plástico, troqueles y dispositivos (de inspección o ensamble).

4.- Fabricar refacciones para los moldes de inyección de plástico, dispositivos de ensamble e inspección, troqueles, etc.

5.- Realizar modificaciones a los herramentales. Modificaciones solicitadas por las áreas de producción, los departamentos de desarrollo técnico e ingeniería de plásticos o los clientes.

6.- Realización de prototipos.

7.- Diseño y fabricación de herramentales nuevos.

El sistema es el taller de mantenimiento de moldes de inyección. Este sistema se forma de varias áreas que realizan actividades definidas. Las actividades están relacionadas con los cinco factores (5 M´s) que intervienen en todo sistema de producción:

- Mano de obra (men).
- Maquinaria y equipo (machinery).
- Dinero (money).
- Método (method).
- Dirección (management).

4.1.2 ESTACIONES DE TRABAJO Y ENTIDADES.

Para el desarrollo de este análisis se identifica a cada una de las áreas que forman el taller de moldes con el nombre de *"estaciones de trabajo"*. Estas *estaciones de trabajo* tienen operaciones basadas en procesos de manufactura bien definidos y establecidos en todo el sistema.

En la tabla siguiente se indica el nombre de las estaciones de trabajo que forman el sistema con una breve descripción de su operación principal y la letra con la que se identificarán en el análisis:

Tabla 12.- Estaciones de trabajo del sistema.

Estación de trabajo	Nombre	Operación principal
A	Ajuste (moldes, troqueles y dispositivos)	Dar el servicio de mantenimiento preventivo o correctivo a todos los herramentales, desarmándolos y armándolos para realizar el cambio de partes o refacciones.
B	Rectificado	Realizar el rectificado de superficies planas o cilíndricas de partes que deben cumplir con las características solicitadas para el ajuste o ensamble de partes nuevas o de refacción para los herramentales.
C	Torno	Realizar el torneado de partes que deben cumplir con las características solicitadas para el ajuste o ensamble de partes nuevas o de refacción para los herramentales.
D	Mantenimiento eléctrico	Asegurar el buen funcionamiento de los sistemas de colada caliente de todos los moldes y de los sistemas eléctricos de gauges o dispositivos para la manufactura.

Tabla 12.- Estaciones de trabajo del sistema. (Continuación).

E	Fresado	Realizar el fresado de partes que deben cumplir con las características solicitadas para el ajuste o ensamble de partes nuevas o de refacción para los herramentales.
F	Erosión por penetración y por hilo	Realizar la erosión de partes que deben cumplir con las características solicitadas para el ajuste o ensamble de partes nuevas o de refacción para los herramentales.
G	Metrología	Realizar la medición de las partes fabricadas por las estaciones de trabajo del sistema para garantizar el cumplimiento de especificaciones de ajuste y ensamble.
H	Diseño y programación CNC	Diseñar y elaborar los dibujos de partes de refacción o nuevas que cumplan con los requerimientos de ajuste o ensamble para los herramentales. Realizar los programas de CNC de acuerdo a la información electrónica proporcionada por Diseño o por otras áreas, para realizar la fabricación de partes nuevas o de refacción para los herramentales.
I	Almacén	Cumplir con el resguardo y control de insumos y herramientas utilizadas por las estaciones de trabajo del taller.
J	Supervisión y Abasto	Coordinar y supervisar las operaciones y actividades realizadas por las entidades del sistema. Garantizar el abasto de los insumos y herramientas utilizadas por las estaciones de trabajo del taller.

Una vez que se han establecido y delimitado las *estaciones de trabajo* sobre la base de los procesos que se llevan a cabo en cada una de ellas, se define a las *entidades.*

Las *entidades* son objeto de interés en este sistema ya que simplifican la estructura del taller a su unidad operativa más simple. Se consideran *entidades* del sistema a las máquinas y a los operadores (mano de obra).

En la tabla siguiente se pueden ver las *entidades* que posee la *estación de trabajo* de fresado:

Tabla 13.- Entidades de una estación de trabajo.

Estación de Trabajo: Fresado	
Entidad	Descripción
1	Fresadora Universal Deckel Maho DMU 50V
2	Fresadora Maho 600C
3	Fresadora Maho 600C
4	Fresadora Deckel FP2A
5	Fresadora Deckel FP3L
6	Fresadora Maho 1000C
7	Operador 1 con habilidad 5
8	Operador 2 con habilidad 2

Esta clasificación va a ser la base para realizar más adelante lo que se identifica como *caracterización* de las *entidades.*

4.1.3 DISTRIBUCIÓN FÍSICA DEL TALLER DE MANTENIMIENTO.

La configuración mostrada corresponde al arreglo del sistema. En este diagrama se observan las entidades identificadas como maquinaria de cada una de las estaciones de trabajo.

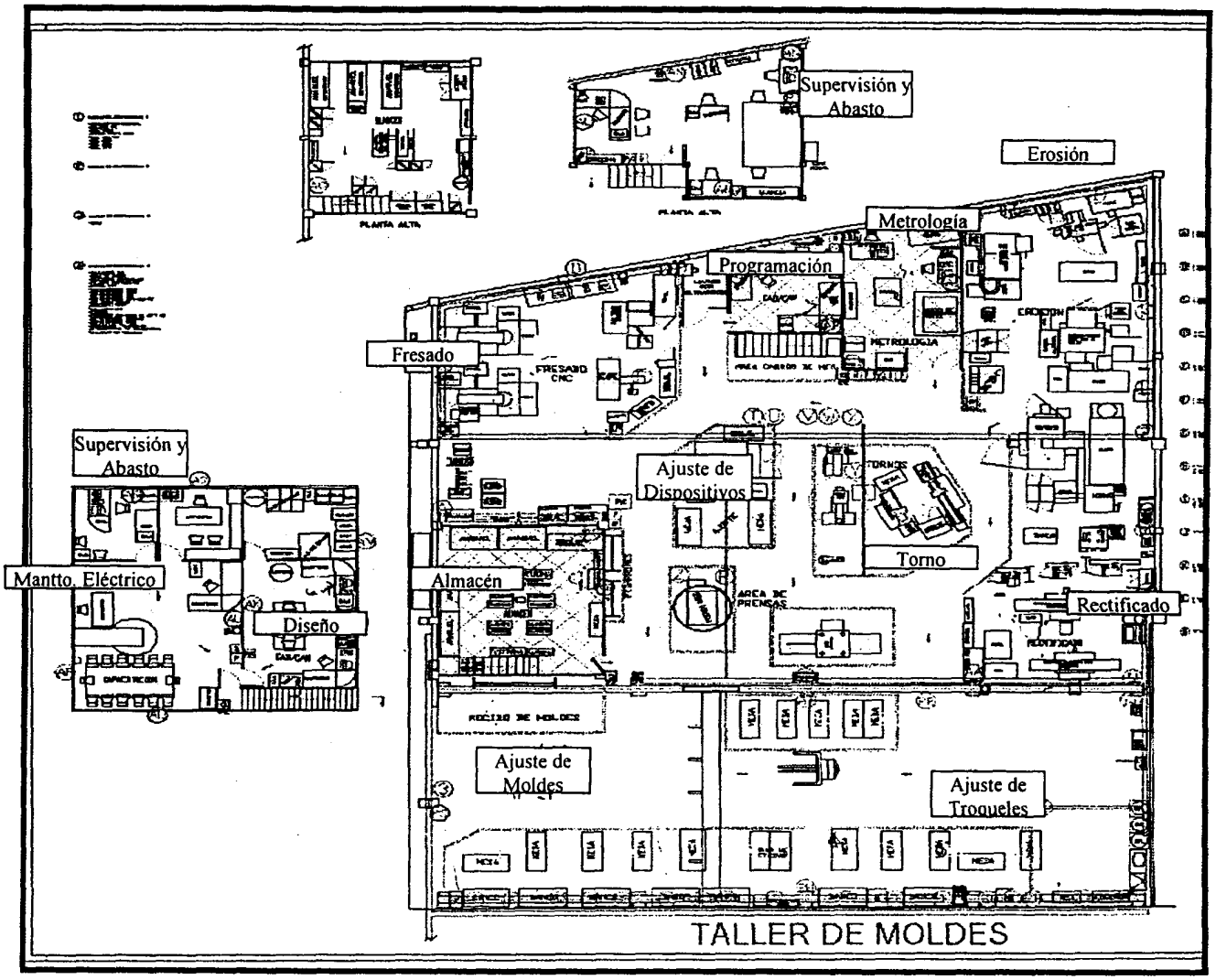


Fig. 8.- Arreglo físico del sistema.

4.2. CARACTERIZACIÓN Y CLASIFICACIÓN.

4.2.1 CARACTERIZACIÓN DE LA MAQUINARIA.

En la caracterización de la maquinaria utilizada en el taller se aplica el término de máquinas fijas para el equipo mecánico o las máquinas herramientas ubicadas en las estaciones de trabajo.

La caracterización de las máquinas fijas consiste en definir al detalle sus características principales de trabajo, tales como:

- Tamaño de la bancada.
- Tamaño de la mesa de trabajo.
- Velocidades de trabajo (avances, rpm´s, etc.).
- Potencia nominal, voltajes y corrientes.

Debido a que el tiempo invertido en mantenimiento y los tiempos muertos por falta de energía eléctrica o paros de máquina hasta este momento no son considerables como para tomarlos en cuenta, se establece que la disponibilidad del equipo es de 24 horas.

Tabla 14.- Caracterización de la maquinaria (datos a considerar).

DATOS DE EQUIPO DEL TALLER DE MOLDES

DEPARTAMENTO: FRESADO, TORNO, EROSIÓN, RECTIFICADO, METROLOGÍA, ALMACÉN, PULIDO

NO. INV.	MAQUINA	AÑO DE FABRICACIÓN	CAPACIDAD	DATOS ELECTRICOS			
				KVA DE TRANSFORMADOR	KVA NOMINAL	VOLTAJE	CORRIENTE
	Erosionadora EMS 4.40 601-0001-95						
	Erosionadora de Hilo 200 D 601-0001-94						
	Erosionadora EMT1 601-0003-90						
	Erosionadora Mitsubishi 604-0003-99						
	Erosionadora EM 2.2 601-0001-93						
	Fresadora Universal Deckel-Maho DMU 50V 604-0004-97						
	Fresadora MAHO 600C (1) 601-0003-93						
	Fresadora MAHO 600C (2) 601-0002-94						
	Fresadora Deckel FP2A 601-0006-93						
	Fresadora MAHO 1000C 601-0002-93						
	Fresadora Deckel FP3L 601-0056-88						
	Rectificadora HANSEAT 11 604-0059-88						
	Rectificadora Saacke 604-0048-88						
	Rectificadora Studer 604-0004-93						
	Afiladora Deckel 604-0003-89						
	Torno Graziano 605-0040-88						
	Taladro Donau 606-0010-88						
	Selladora Reis 611-0001-89						
	Máquina para pruebas de refrigeración 604-0007-91						
	Sierra cinta Jaespa 604-0008-91						
	Prensa hidráulica con volante Ageo 608-0043-88						
	Horno para temple Caisa Alley 602-0058-88						
	Máquina para soldar cinta para sierra cinta 610-0012-91						
	Montacargas de 1.5 toneladas 704-0044-88						
	Cargador de baterías 701-0045-88						
	Sierra circular 604-0002-97						
	Cabina de Sandblasteo 701-0003-97						
	Dispositivo Dolico 607-0005-93						
	Soldadora Trioinvert Argón 610-0004-98						
	Ultrasonido Laptron 611-0005-98						
	Medidora de coordenadas Wenzel 702-0004-99						
	Durómetro de banco Emcotest						
	Comparador óptico Hauser						
	Equipo para soldadura de oxi-acetileno	Equipo prestado a mantenimiento.					
	Soldadora de Argón en Frío 610-0005-00						
	Afiladora Saacke 102						
	Afiladora de htas. de corte Misa 1097						
	Afiladora de htas. de corte Deckel 097						
	Erosionadora Agie 1089						
	Erosionadora Agie 1084						
	Perfiladora Saacke 2102						
	Prensa neumática Reis 1101						
	Rectificadora de sup. Planas Hanseat 1085						
	Sierra cinta Rekord 1138						
	Taladro de columna 093						
	Torno horizontal Pinacho 083						
	Soldadora Miller MI-250-CA/CD						
	Esmeril 086						

4.2.2 CARACTERIZACIÓN DEL PERSONAL OPERATIVO.

En la caracterización del personal operativo existen una serie de factores que deben tomarse en cuenta. Cada operador, al igual que las máquinas fijas, está destinado a realizar funciones específicas; sin embargo, los factores mencionados tienen que ver con el comportamiento humano y determinan el desarrollo de cada una de las actividades desempeñadas. El factor psicológico, el social, el educativo, etc., se reflejan en condiciones como:

- El personal operativo presenta diferentes niveles de habilidad (la velocidad entre un operador y otro no es la misma para desarrollar actividades idénticas, conocimiento, destreza, etc.)

- La calidad de su trabajo dependerá de la experiencia y capacitación.

- Existen varios niveles a través de los cuales se puede identificar el grado de confiabilidad de un operador.

- La disponibilidad que tiene es de ocho horas al día.

- De acuerdo con la normatividad ya establecida, semanalmente pueden laborar hasta 9 horas extras; sin embargo, por lo regular esto no es limitante. En ocasiones trabajan hasta 24 horas continuas con la condición de no trabajar al día siguiente.

- Corren el riesgo de accidentarse y salir del plan de trabajo.

- El ritmo que tienen no es constante. Conforme avanza el día su rendimiento tiende a disminuir.

Para detallar más este punto se ha establecido una metodología de evaluación que consiste en dar seguimiento personalizado a las características físicas y mentales de cada uno de los trabajadores. Este seguimiento se compone de:

- Evaluaciones periódicas de la destreza manual del operador.
- Evaluaciones periódicas de la agilidad mental del operador.
- Evaluaciones periódicas del nivel de los conocimientos técnicos que posee el operador en temas relacionados con su área de trabajo.
- Evaluaciones del rendimiento físico y mental que posee cada uno de los operadores. La capacidad de resistencia al trabajo bajo estrés es importante.
- Evaluaciones periódicas relacionadas con la sociabilidad y la capacidad de trabajo en equipo.

A lo anterior se agregan datos estadísticos que permiten ponderar niveles de responsabilidad y rendimiento ante el trabajo, tales como:

- Puntualidad. Cantidad de retardos reportados en un periodo de tiempo definido.
- Cantidad de Ordenes de Trabajo reportadas mensualmente.
- Cantidad de permisos personales solicitados para entrar o salir fuera de los horarios de trabajo establecidos.
- Días de vacaciones disfrutados.
- Cantidad de asistencias a trabajos que no están directamente relacionados con su área de responsabilidad.

Con la estructura de evaluación y seguimiento establecidos, se asigna un nivel y puesto que reflejen la capacidad que tiene cada operador para resolver problemas. En la tabla siguiente se indican los puestos y niveles considerados.

Tabla 15.- Puestos y niveles del personal operativo.

	C.C.	NOMBRE	# NOMINA	FECHA DE INGRESO	NIVEL	PUESTO
1	10	Domingo Quintanar Fragoso	767	02/06/1973	ON XIV	AJUSTADOR A
2	10	Antonio Juárez Prado	768	30/04/1979	ON XIII	RECTIFICADOR A
3	10	Ignacio Paulin Hilario	773	26/01/1981	ON XII	AJUSTADOR C
4	10	Guillermo Pichardo	775	01/04/1981	ON XIV	AJUSTADOR A
5	10	Flaviano Corona Espinola	776	01/11/1981	ON XIV	AJUSTADOR A
6	10	Nicolás González Valdés	781	13/08/1984	EM VI	SUPERVISOR A
7	10	Alvaro Hernández Aparicio	788	09/09/1986	ON XIII	AJUSTADOR A
8	10	Alberto Fuentes Rivera	845	23/05/1989	ON XIII	EROSIONADOR A
9	10	Jesús Jiménez Martínez	847	22/05/1989	ON XI	TORNERO B
10	10	Juan Carlos Campos Perez	1575	27/01/1992	ON XI	AJUSTADOR D
11	10	Arturo Sánchez Chavez	1579	27/01/1992	ON XIV	AJUSTADOR A
12	10	Aristeo López Velázquez	1581	27/01/1992	ON XIV	FRESADOR CNC A
13	10	Arturo Suárez Oliveros	1583	27/01/1992	ON XIV	AJUSTADOR A
14	10	Alfredo Mendez Tapia	1898	16/06/1993	ON XII	EROSIONADOR B
15	10	Eduardo Reyes Rivas	1902	21/06/1993	ON XII	AJUSTADOR C
16	10	Ignacio Monroy Reyes	1903	23/06/1993	ON XI	AJUSTADOR D
17	10	Gilberto García Lozano	1909	05/07/1993	EM V	PROGRAMADOR CNC C
18	10	Antonio F. Orozco Balderas	1951	23/02/1994	ON XII	EROSIONADOR B
19	10	Eduardo Vargas Pozos	1964	09/05/1994	EM VI	SUPERVISOR A
20	10	Wilfried J. Lehnert Alzuhn	1992	13/10/1994	CO III	JEFE B
21	10	Eduardo Gómez Gómez	2101	09/09/1996	EM V	DISEÑADOR A
22	10	José A. López Contreras	2175	21/04/1997	EM IV	METROLOGISTA A
23	10	Jose Gpe. López Escobedo	2749	14/06/1999	ON XI	AJUSTADOR D
24	10	Jose A. Carreño Sanchez	2824	09/11/1999	EM V	SUPERVISOR B
25	10	Martín Díaz Juárez	2862	07/02/2000	ON V	AYUDANTE ESP. E
26	10	Edgar Chávez Segura	2864	14/02/2000	EM IV	DISEÑADOR B
27	10	V. Manuel Rivera González	2875	16/02/2000	ON V	AYUDANTE ESP. E
28	10	Israel Nieto Robledo	2923	10/04/2000	ON XI	AJUSTADOR D
29	10	Jesús Sánchez Hernández	2935	02/05/2000	ON XI	AJUSTADOR D
30	10	Ricardo Rebollo Resendiz	3023	01/08/2000	ON X	MECANICO D
31	10	Andrés A. Hernández Fonseca	3028	07/08/2000	ON XII	AJUSTADOR C
32	10	Miguel A. Hernández Rodríguez	3255	16/01/2002	ON XII	AJUSTADOR C
33	10	Froylán Fernández Cruz	3262	01/02/2002	ON XII	AJUSTADOR C

ON - Obrero no sindicalizado.
EM – Empleado.
CO – Trabajador de confianza.

Puesto

A
B
C
D
E

Nivel de confiabilidad

La importancia de los niveles se indica con el número romano que les sigue. El nivel ONXI es de menor peso que el ONXIV.

La disponibilidad de la maquinaria se considera de 24 horas los 365 días del año; sin embargo, la disponibilidad del personal operativo esta condicionada. Es importante establecer un programa que ayude a optimizar el uso del recurso humano, de tal forma que se pueda ofrecer el servicio del taller los 365 días del año sin correr el riesgo de caer en desgastes excesivos o en situaciones de descuido del servicio en cantidad o calidad por ausencia o fatiga de los operadores.

Se han realizado cuatro clasificaciones para los horarios de trabajo. Se conocen comúnmente como turnos y se clasifican según la tabla anexa. Es importante señalar que todo el personal operativo está contratado bajo la modalidad de *empleado de confianza.* La normatividad vigente señala que se deben laborar máximo 42.5 horas por semana para aquellos que laboran turno mixto y 37.5 horas para los que laboran turno nocturno.

Los operadores se pueden organizar de diferentes formas para ofrecer el servicio del taller el mayor tiempo posible. Todos los operadores están organizados en tres turnos y una guardia de fin de semana para cubrir las 24 horas de los 365 días del año.

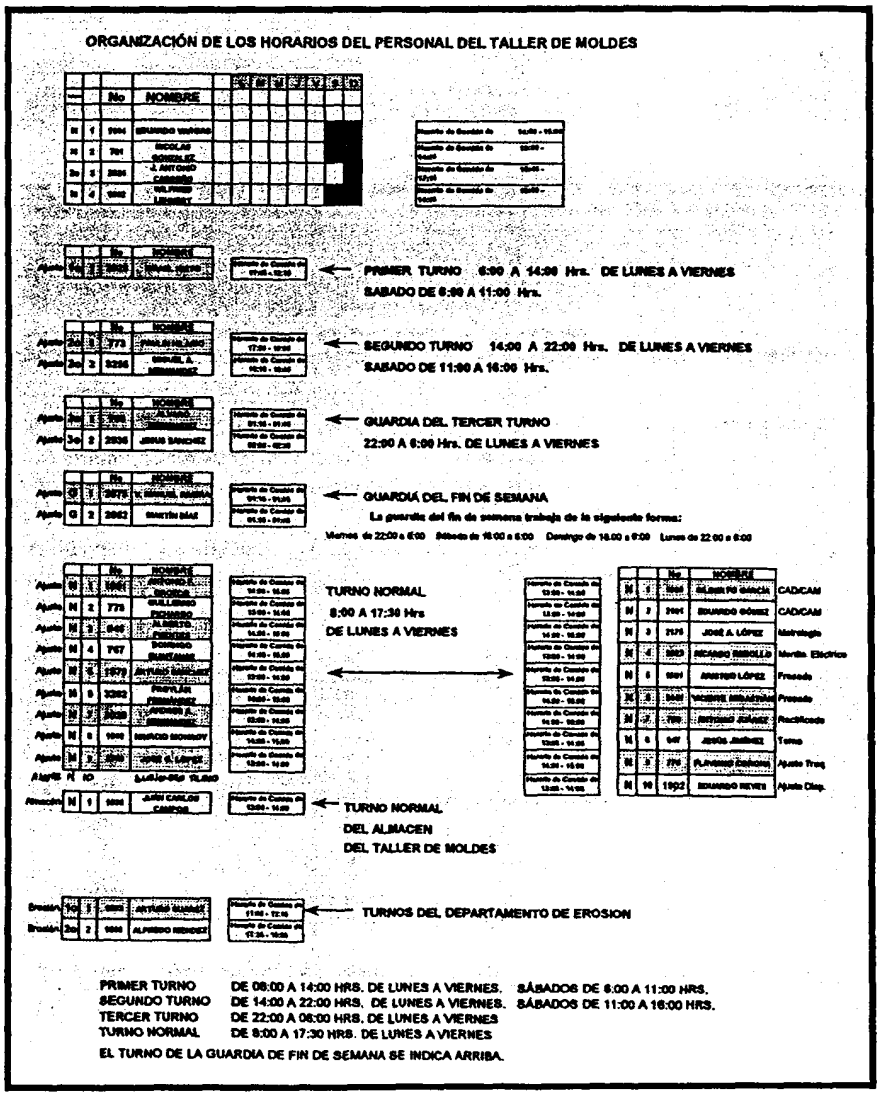


Fig. 9.- Organización de los horarios del personal del taller.

Se definen también las habilidades necesarias para desarrollar las actividades y cubrir de forma satisfactoria los requerimientos de cada uno de los puestos de trabajo. De esta manera las habilidades se listan de la siguiente forma:

- Realizar mediciones en la Mesa de Medición de Coordenadas (CMM).
- Realizar programas de CNC.
- Ajuste de las partes mecánicas de un molde.
- Realizar diferentes niveles de pulido en el acero.
- Fresar.
- Tornear.
- Erosionar por penetración y por hilo.
- Realizar el diseño de herramentales.
- Aplicar soldadura.

Tabla 16.- Caracterización del personal operativo.

FECHA: 04 de Agosto de 2003

CARACTERIZACION DEL PERSONAL

	NOMBRE	No. de Empleado	[illegible]	[illegible]	Actividad: Metrología y Calidad	Diseño	Programación CNC	Ajuste Moldes								Ajuste Disp./Troq.		MAQUINADOS				Almacén	[illegible]				
					Medir CMM	Diseñar	Programar CNC	Diferentes Herramentales	Afilar Herramienta	Soldar	Pulir	Sistemas Eléctricos	Sistemas Hidráulicos	Sistema Neumático	Sistemas de Refrigeración	Dispositivos	Troqueles	Fresado	Erosión	Rectificado	Torno		[illegible]	1a	2a	3a	G
1	Domingo Quintanar Fragoso	767	30	12	0	0	8	10	10	10	10	7	8	8	8	5	8	0	6	8	8	0	X				
2	Antonio Juárez Prado	798	24	8	0	0	0	0	0	0	0	6	0	0	8	5	0	6	0	10	8	0	X				
3	Ignacio Paulin Hilario	773	22	8	0	8	0	10	8	8	10	6	6	6	8	6	8	0	6	8	0	0			X		
4	Guillermo Pichardo	775	22	15	0	6	0	10	10	8	8	6	6	6	8	5	0	0	0	0	7	0	X				
5	Pioquinto Corona Espinosa	776	21	5	8	5	0	10	10	10	6	8	8	6	7	8	10	6	0	10	8	0	X				
6	Nicolás González Valdés	781	19	21	0	0	0	10	10	8	7	5	8	6	8	6	7	0	0	7	7	6	X				
7	Alonso Hernández Aparicio	788	17	25	8	8	0	10	10	7	9	5	7	7	7	7	8	0	0	8	5	0				X	
8	Alberto Fuentes Rivera	845	14	6	0	0	0	10	10	7	8	9	9	8	9	6	6	5	10	8	8	0	X				
9	Jesús Jiménez Martínez	847	14	18	0	8	0	4	0	6	0	6	0	6	0	5	4	0	0	4	10	0	X				
10	Juan Carlos Campos Pérez	1575	11	6	0	0	0	8	8	3	3	3	5	5	5	5	8	5	0	10	8	10	X				
11	Angel Sánchez Chávez	1579	11	7	0	6	0	10	8	7	9	8	8	8	6	0	5	0	0	8	6	0	X				
12	Adrián López Velázquez	1581	11	8	0	0	0	0	0	0	0	0	8	0	8	5	0	10	0	3	8	0	X				
13	Arturo Suárez Oliveros	1583	11	12	0	0	6	5	5	0	0	0	0	8	0	6	0	0	10	4	4	0		X			
14	Alfredo Méndez Tapia	1698	10	9	0	0	7	6	5	0	0	0	0	0	0	5	8	5	10	8	10	0			X		
15	Eduardo Reyes Rivas	1802	10	11	0	0	0	8	0	6	6	6	6	6	3	10	5	6	0	8	3	0	X				
16	Ignacio Monroy Reyes	1803	10	16	0	9	0	8	5	5	4	6	7	7	6	6	6	0	0	7	5	6	X				
17	Gilberto García Lozano	1809	10	13	5	5	10	0	0	0	0	0	0	0	0	6	3	8	3	8	0	0	X				
18	Antonio F. Orozco Balderas	1851	9	7	0	0	0	10	8	6	10	8	8	8	6	5	0	8	8	7	6	0	X				
19	Eduardo Vargas Pozos	1864	9	8	0	5	0	6	5	8	6	8	5	5	6	6	5	0	0	8	0	0	X				
20	Wilfred J. Lehnert Alzuha	1982	8	3	0	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	X				
21	Eduardo Gómez Gómez	2141	7	16	0	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	X				
22	José A. López Contreras	2175	6	15	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	X				
23	Juan Gpe. López Escobedo	2749	4	11	0	0	0	10	10	7	8	8	8	8	8	3	0	7	0	8	9	0	X				
24	José A. Carreño Sánchez	2824	3	0	0	0	0	10	8	7	8	8	8	8	0	6	0	0	0	7	0	0			X		
25	Magín Díaz Juárez	2862	3	1	0	0	6	8	5	6	9	6	6	6	6	4	4	0	0	6	7	0					X
26	V. Manuel Rivera González	2875	3	9	0	0	0	8	7	8	5	7	7	7	7	4	0	4	0	7	7	0					X
27	Israel Nieto Robledo	2923	3	8	0	6	0	10	0	6	8	5	6	8	8	6	0	0	0	8	8	0		X			
28	Jesús Sánchez Hernández	2935	3	9	0	0	0	10	8	4	6	7	7	7	7	5	0	7	0	7	9	0				X	
29	Ricardo Rebollo Rasendiz	3023	3	12	0	6	0	0	0	0	0	10	8	8	0	3	0	0	0	0	0	5	X				
30	Andrés A. Hernández Fonseca	3028	3	10	0	0	0	10	9	6	6	6	9	8	9	3	0	0	0	7	5	0	X				
31	Miguel A. Hernández Rodríguez	3255	1	0	0	0	0	10	8	6	6	7	7	7	6	0	0	7	0	7	8	0			X		
32	Froylán Fernández Cruz	3262	1	7	0	0	0	10	8	6	7	8	8	8	8	0	0	0	0	8	8	0	X				
33	Vicente Sebastián Guerrero	3441	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	0	0	0	0	10	0	0	0	0	X				

4.2.3 CARACTERIZACIÓN DE LAS ACTIVIDADES PRINCIPALES DEL TALLER.

La historia de los trabajos realizados por el taller es la base para determinar cuales han sido las actividades desarrolladas con el paso del tiempo. Se ha tomado la información originada durante dos años de trabajo, resultando los siguientes porcentajes de participación:

- 81 % de mantenimientos correctivos.
- 12 % de mantenimientos preventivos.
- 5 % de trabajos de fabricación de dispositivos y refacciones.
- 3 % de modificaciones a herramentales ya existentes.

La actividad con el mayor porcentaje es la del mantenimiento correctivo. El objetivo es invertir esta tendencia hacia el mantenimiento preventivo.

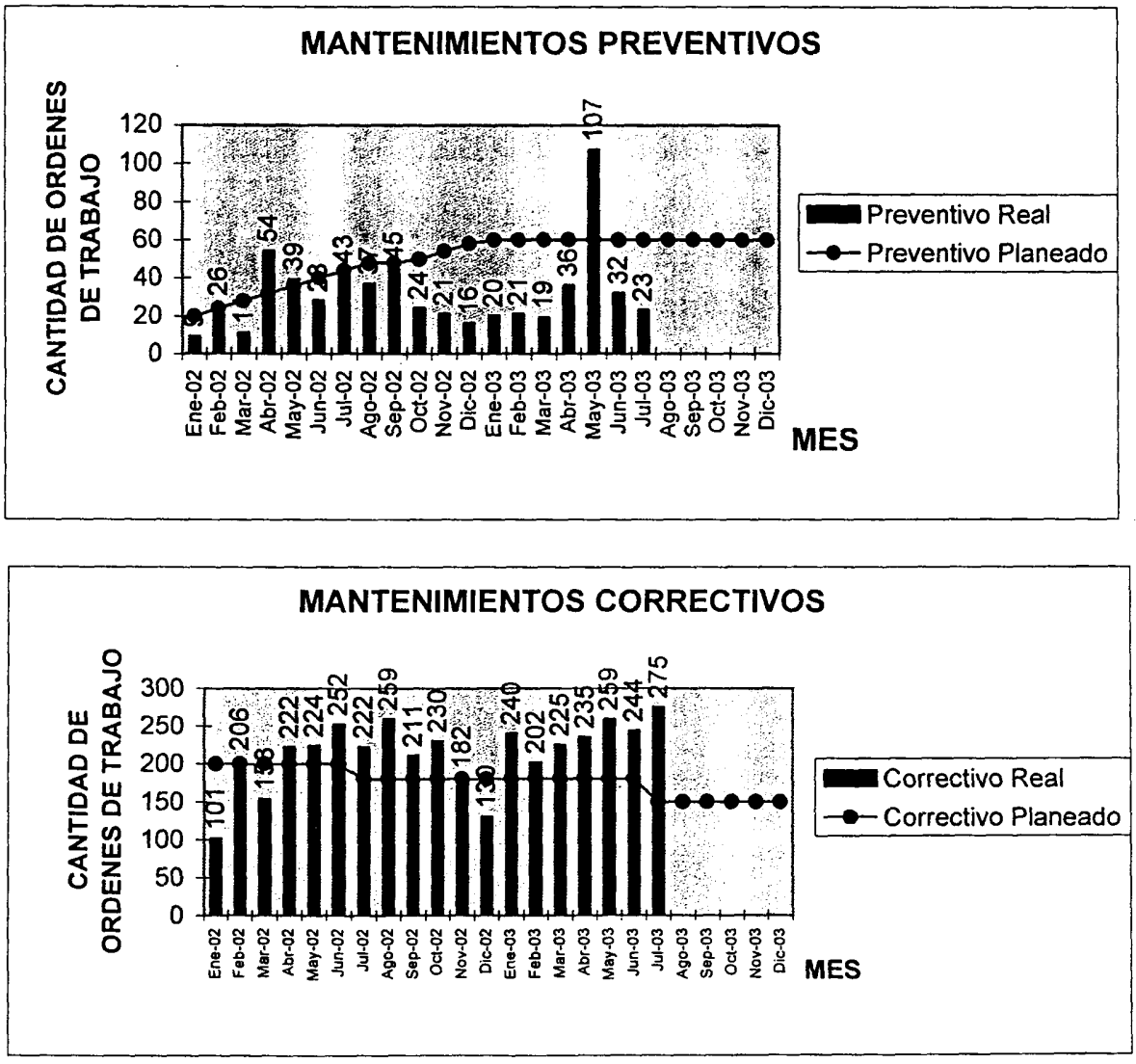


Fig. 10.- Cantidad de mantenimientos preventivos y correctivos.

Definiendo que la actividad de mayor peso corresponde a la de los mantenimientos correctivos, se desglosan las actividades y se detallan las acciones que los componen. De esta manera damos paso a la interrogante que busca aclarar cuales son las actividades en las que consiste el mantenimiento correctivo.

Para responder a la pregunta de ¿cuáles son estas actividades?, se identifican las partes representativas de un molde de inyección de plástico y se obtiene un listado de las fallas más comunes que presenta cada una de ellas. De esta manera se crea un código que se conforma de las siguientes partes:

TIPO DE EVENTO	CLASIFICACIÓN DE LA FALLA O SOLUCIÓN	NUMERO D E IDENTIFICACIÓN DEL COMPONENTE	CONSECUTIVO DE LA FALLA O SOLUCIÓN
(1 dígito)	(1 dígito)	(2 dígitos)	(2 dígitos)

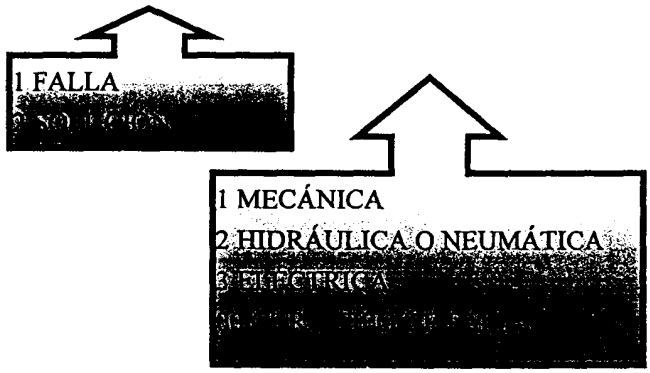


Fig. 11.- Componentes del código de identificación de fallas.

Ejemplos:

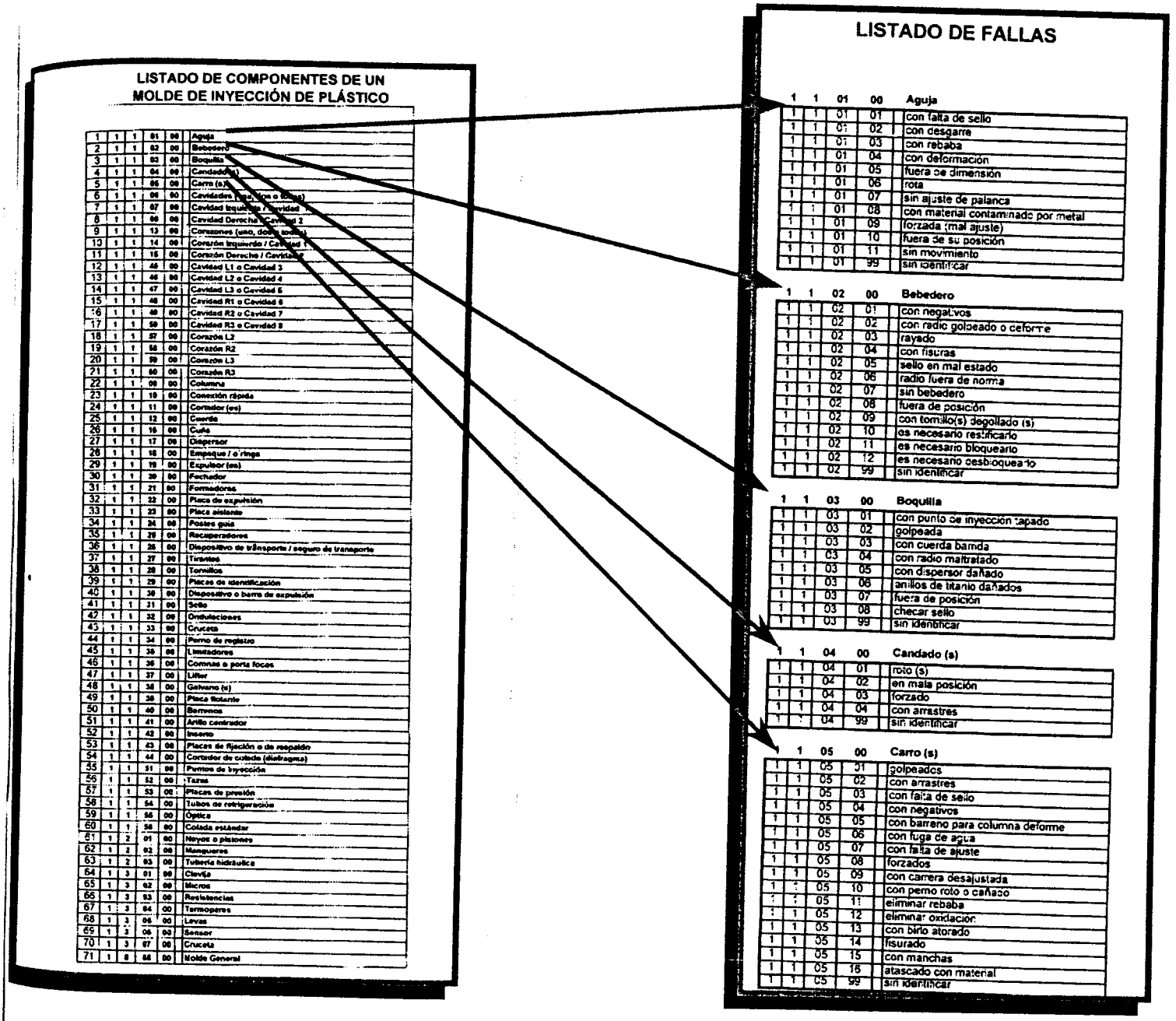
Código para especificar la falla de una aguja rota: 1 1 01 06

Código para especificar la falla de una boquilla con radio maltratado: 1 1 03 04

Código para especificar la falla de un candado con arrastres: 1 1 04 04

Código para especificar un carro con falta de sello: 1 1 05 03

Listado de las partes componentes de un molde de inyección de plástico junto con el listado de sus fallas más representativas.



COMPONENTES

COMPONENTES Y SUS FALLAS

Fig. 12.- Componentes y sus fallas.

4.2.4 RELACIÓN ENTRE LAS ESTACIONES DE TRABAJO Y LAS ACTIVIDADES A DESARROLLAR.

En el proceso de la estructuración del modelo de análisis es importante relacionar cada una de las actividades desarrolladas en el taller con las estaciones de trabajo y sus entidades. De esta manera se conoce el vínculo directo que hay entre ellas. Se puede conocer la capacidad que tiene una estación de trabajo para aceptar una labor a partir de conocer el número de operadores y la cantidad de máquinas fijas que tiene y de tener bien establecidas el tipo y cantidad de actividades en desarrollo o pendientes.

Entonces se crea el formato que se presenta a continuación. En este formato se establece la relación de las variables anteriormente mencionadas. A partir del tipo de falla que se presenta, conocemos cuáles son las *estaciones de trabajo* que deben intervenir para darle solución, además de conocer también cuáles son los recursos utilizados y el tiempo promedio que se lleva en realizar las actividades que se listan en la relación de soluciones.

urrencia e 01/01/02	Código y Concepto de Falla					Hrs	Moviles	Fijas	Hrs	Moviles	Fijas
							(17)	(0)		(1)	(6)
	1	1	01	00	Aguja						
2	1	1	01	01	con falta de sello	18	2		3	1	1
2	1	1	01	02	con desgarre	18	2		6	1	1
4	1	1	01	03	con rebaba	18	2		3	1	1
1	1	1	01	04	con deformación	18	2		6	1	1
4	1	1	01	05	fuera de dimensión	18	2		6	1	1
1	1	1	01	06	rota	18	2		6	1	1
3	1	1	01	09	forzada (mal ajuste)	24	2				
2	1	1	01	10	fuera de su posición	18	2				
2	1	1	01	11	sin movimiento	18	2		6	1	1
	1	1	03	00	Boquilla						
1	1	1	03	03	con cuerda barrida	30	2				

Fig. 13.- Formato para establecer la relación entre variables.

LISTADO DE FALLAS

MOLDE: Mica Utility 222 997 01 1

ESTACIÓN DE TRABAJO INDICANDO HORAS, MAQUINAS MOVILES Y MAQUINAS FIJAS EMPLEADAS

Ocurrencia desde 01/01/02	Código y Concepto de Falla					A - Ajuste			B - Rectificado			C - Torno			D - Servicio Electrico			E - Fresado			F - Erosión			G - Metrologia			H - CAD/CAM			Almacén			Horas Totales
						Hrs	Moviles	Fijas	Hrs	Moviles	Fijas	Hrs	Moviles	Fijas	Hrs	Moviles	Fijas	Hrs	Moviles	Fijas	Hrs	Moviles	Fijas	Hrs	Moviles	Fijas	Hrs	Moviles	Fijas	Hrs	Moviles	Fijas	
							(17)	(0)		(1)	(6)		(3)	(2)		(1)	(0)		(2)	(5)		(2)	(5)		(1)	(1)		(2)	(3)		(1)	(0)	
	1	1	01	00	Aguja																											
2	1	1	01	01	con falta de sello	18	2		3	1	1																					
2	1	1	01	02	con desgarre	18	2		6	1	1																					
4	1	1	01	03	con rebaba	18	2		3	1	1																					
1	1	1	01	04	con deformación	18	2		6	1	1																					
4	1	1	01	05	fuera de dimensión	18	2		6	1	1																					
1	1	1	01	06	rota	18	2		6	1	1																					
3	1	1	01	09	forzada (mal ajuste)	24	2																									
2	1	1	01	10	fuera de su posición	18	2																									
2	1	1	01	11	sin movimiento	18	2		6	1	1																					
	1	1	03	00	Boquilla																											
1	1	1	03	03	con cuerda barrida	90	2																									
	1	1	04	00	Candado (s)																											
2	1	1	04	01	roto (s)	3	1		2	1	1							6	1	1												
1	1	1	04	02	en mala posición	1	1																									
1	1	1	04	04	con arrastres	1	1																									
	1	1	06	00	Cavidades (una, dos o todas)																											
1	1	1	X	02	con golpes	18	2																									
15	1	1	X	03	con manchas	3	1																									
23	1	1	X	04	con negativos	10	2																									
1	1	1	X	06	con fuga de agua	30	2																									
3	1	1	X	07	con problemas de refrigeración	12	2																									
2	1	1	X	09	opaces (falta de pulido)	12	2																									
3	1	1	X	12	eliminar rebaba	18	2																									
2	1	1	X	14	engrosar pared (es)	4	1																									
3	1	1	X	21	falta de sello en contorno	24	2																									

Fig. 14.- Formato básico para establecer la relación existente entre las variables del sistema.

4.3 ESTRUCTURACIÓN.

4.3.1 ESTABLECIMIENTO DE UN SISTEMA DE CODIFICACIÓN PARA LA IDENTIFICACIÓN RÁPIDA DE LA ACTIVIDAD Y LA ESTACIÓN DE TRABAJO.

El objetivo de este punto es encontrar una forma de representación cualitativa y cuantitativa de un taller típico de mantenimiento de moldes.

Esta representación buscará una adaptación de un sistema tipo taller (job shop) combinado con un sistema de ensamble y estaciones de trabajo del tipo máquinas y operadores de capacidad variable.

Presentación de la falla en el formato básico que establece la relación entre las variables del sistema, establecido previamente.

EJEMPLO: FALLA 1 1 36 08 (CORONAS O PORTAFOCOS FISURADOS) EN EL MOLDE BISEL MB MOPF 223 157 00 1

LISTADO DE FALLAS

MOLDE: Bisel MB Mopf 223 157 00 1

ESTACIÓN DE TRABAJO INDICANDO HORAS, MAQUINAS MOVILES Y MAQUINAS FIJAS EMPLEADAS

Código y Concepto de Falla	A - Ajuste			B - Rectificado			C - Torno			D - Servicio Electrico			E - Fresado			F - Erosión			G - Metrología			H - CAD/CAM			I - Almacén			Horas Totales
	Hrs	Moviles	Fijas	Hrs	Moviles	Fijas	Hrs	Moviles	Fijas	Hrs	Moviles	Fijas	Hrs	Moviles	Fijas	Hrs	Moviles	Fijas	Hrs	Moviles	Fijas	Hrs	Moviles	Fijas	Hrs	Moviles	Fijas	
		(17)	(0)		(1)	(6)		(1)	(2)		(1)	(0)		(2)	(5)		(2)	(5)		(1)	(1)		(2)	(3)		(1)	(0)	
1 1 36 08 Coronas o porta focos																												
1 1 36 04 atascada con materiel	8	1																										
1 1 36 06 con rebabe	8	1																										
1 1 36 07 despostillados	8	1																										
1 1 36 08 fisurados	24	2											17	2	2	36	2	2				24	1	1				

Fig. 15.- Ejemplo. Falla 1 1 36 08.

BASE DE LA ESTRUCTURACIÓN

EJEMPLO: FALLA 1 1 36 08 (CORONAS O PORTA FOCOS FISURADOS) EN EL MOLDE BISEL MB MOPF 223 157

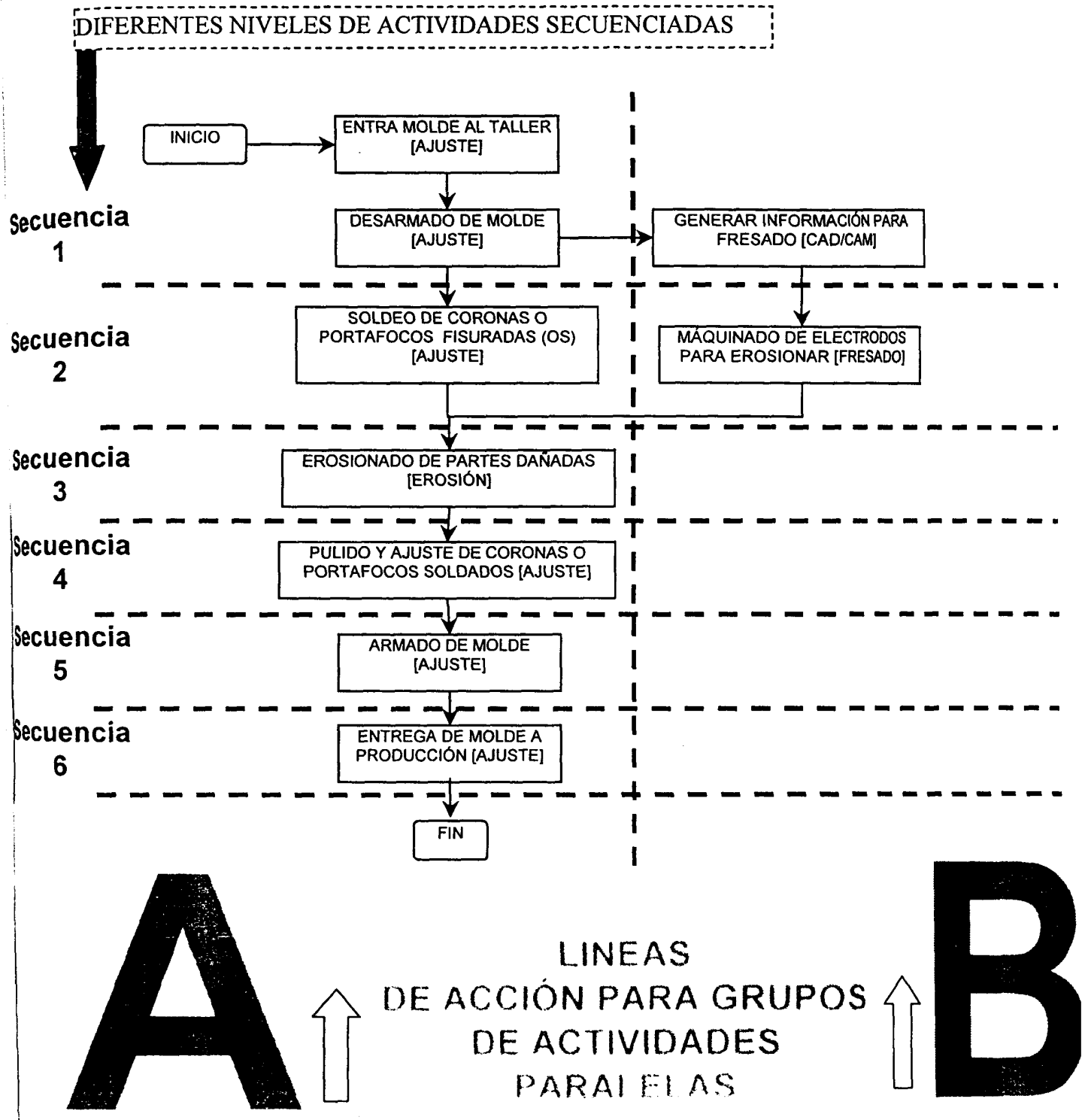
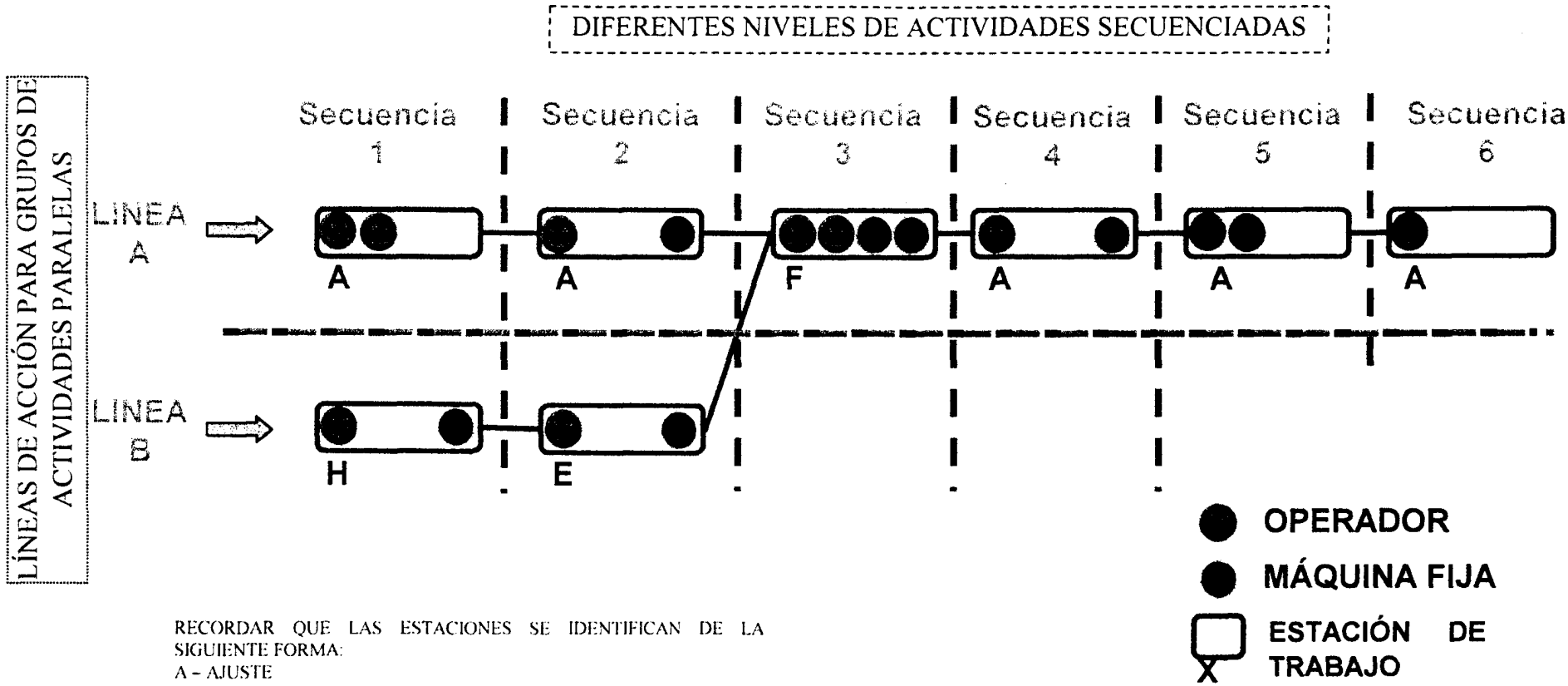


Fig. 16.- Base de la estructuración.

4.3.2 ESQUEMATIZADO DE LA FALLA.



RECORDAR QUE LAS ESTACIONES SE IDENTIFICAN DE LA SIGUIENTE FORMA:
A – AJUSTE
B – RECTIFICADO
C – TORNO
D – MANTENIMIENTO ELÉCTRICO
E – FRESADO
F – EROSIÓN
G – METROLOGÍA
H – DISEÑO Y PROGRAMACIÓN CNC
I – ALMACÉN
J – SUPERVISIÓN Y ABASTO

Fig. 17.- Esquematizado de la falla.

ESQUEMATIZADO DE LA FALLA

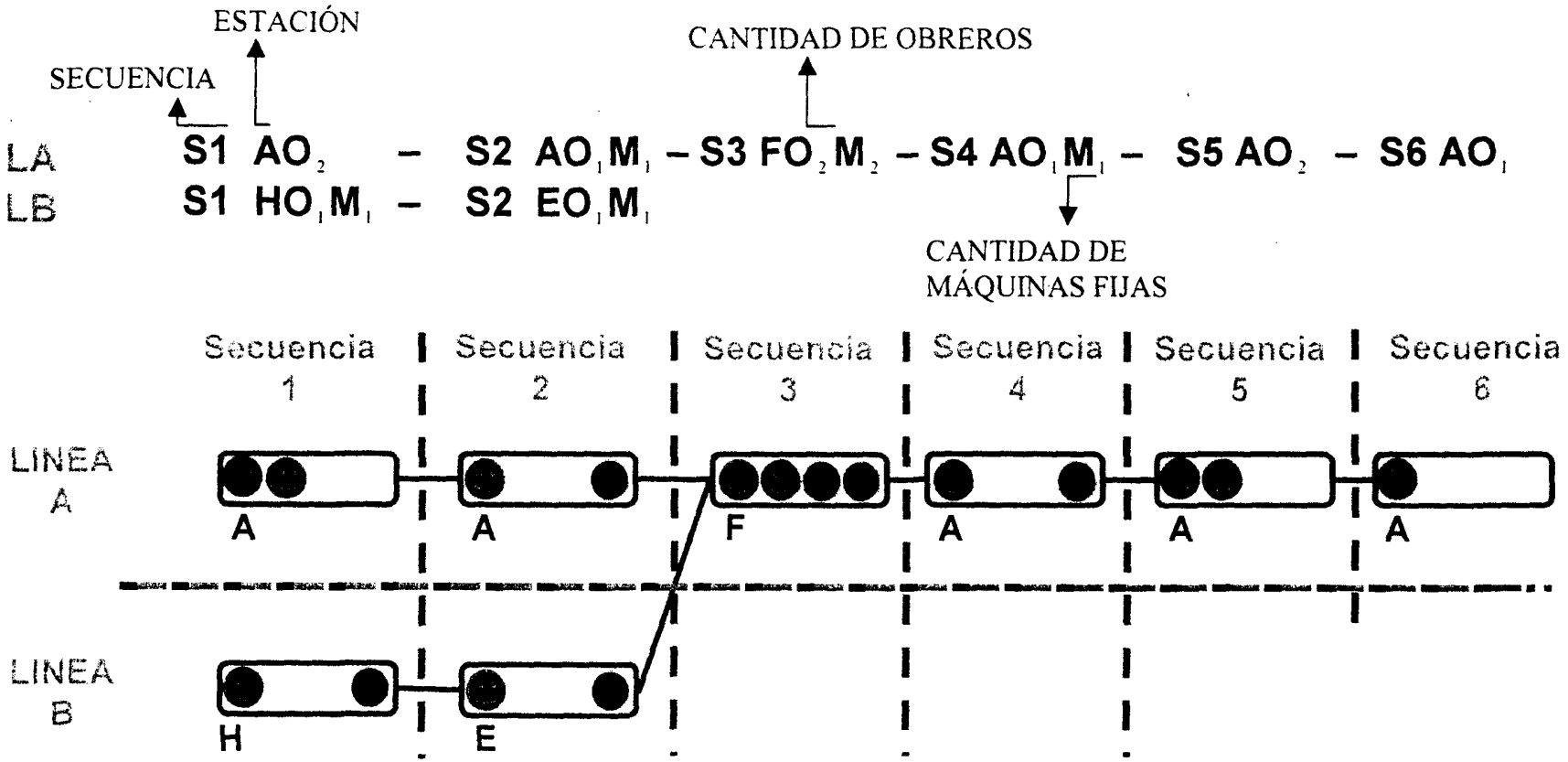


Tabla 17.- Grupo de fallas esquematizadas para diferentes moldes.

GRUPO DE FALLAS ESQUEMATIZADAS PARA DIFERENTES MOLDES

AO_2 / HO_1M_1	AO_1M_1 / EO_1M_1	FO_2M_2	AO_1M_1	AO_2	AO_1	FALLA 1 1 36 08 (CORONAS O PORTAFOCOS FISURADOS) MOLDE BISEL MB MOPF 223 157
AO_2	CO_1M_1	AO_1				FALLA 1 1 02 02 (CON RADIO GOLPEADO O DEFORME) MOLDE REFLECTOR A4 963 643 00 1
AO_1 / IO_1	AO_1M_1	EO_1M_1	BO_1M_1	AO_1		FALLA 1 1 39 04 (PLACA FLOTANTE CON TIRANTES DAÑADOS) MOLDE MICA MOPF 223 359 00 1
AO_2 / IO_1	DO_1	AO_2				FALLA 1 3 03 02 (RESISTENCIA ABIERTA) MOLDE MICA PT44 223 011 00 1
AO_2 / I1O	FO_2M_2	BO_1M_1	AO_2			FALLA 1 1 19 01 (EXPULSORES ROTOS) MOLDE MICA FACE LIFT 224 751 00 1
AO_2						FALLA 1 1 07 01 (CAVIDAD CON RAYAS) MOLDE MICA VENTO A4 963 673 00 1
AO_1	AO_1M_1	EO_1M_1	BO_1M_1	AO_1		FALLA 1 1 37 10 (LIFTER DEFORME) MOLDE MICA UTILITY 222 997 01 1

4.3.3 PATRÓN BASE DE CODIFICACIÓN.

El patrón base para realizar la codificación queda de la siguiente forma:

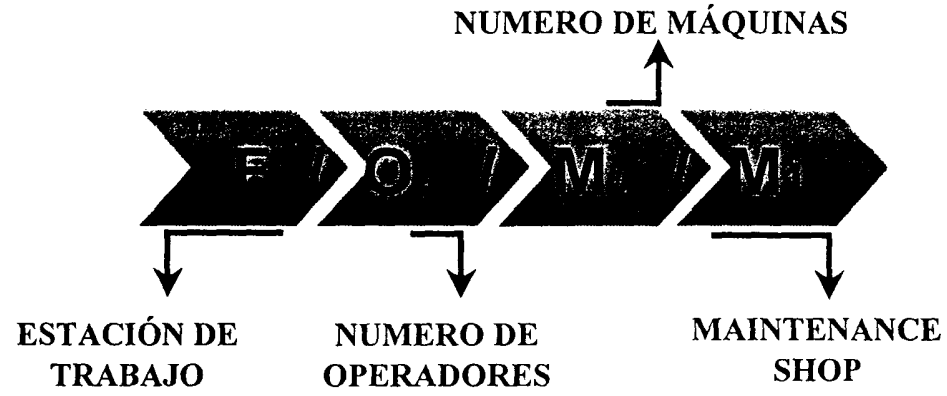


Fig. 18.- Patrón base de codificación.

4.3.4 CONSIDERACIÓN DE LA VARIABLE "PRIORIDAD".

La variable más crítica y que influye de forma determinante en el desarrollo del trabajo dentro del taller de mantenimiento es la variable "prioridad".

Como se indicó anteriormente, el trabajo más importante y al que está destinada toda la capacidad del taller de moldes es mantener trabajando a 52 máquinas de inyección de plástico que utilizan los moldes de los que es responsable el taller; sin embargo, ocasionalmente se presentan otras prioridades que se manejan según el área que las genera o las afectaciones que pueden crear.

El trabajo en el taller siempre se organiza con base a las prioridades señaladas por los clientes internos. De esta manera se asegura el cumplimiento de los objetivos del grupo. Independientemente de quien solicita el trabajo, dependiendo del impacto que genere su solicitud en el resultado del grupo, es como se asignan las prioridades.

Prioridades más comunes clasificadas por el área que las genera:

Departamento de Producción:

1.- Riesgo de no cumplir con el programa de entregas al cliente.
2.- Baja existencia de producto en almacenes y en tránsito.
3.- Baja disponibilidad de máquina para inyectar el producto.

Departamento de Aseguramiento de Calidad:

1.- Atención a reclamos del cliente.
2.- Atención a problemas potenciales de calidad que necesitan atención inmediata.
3.- Atención a problemas reportados en auditorias internas.

Departamento de Desarrollo Técnico:

1.- Cumplir con los compromisos adquiridos con el cliente: entrega de muestras, cumplimiento de fechas comprometidas, proyectos nuevos, arranques de producción, etc.
2.- Participar en el desarrollo de aspectos de mejora en los productos.
3.- Realizar modificaciones relacionadas con la reducción de costos.

Departamento de Compras:

1.- Atender a los reclamos generados por problemas de calidad de los herramentales o moldes que se encuentran en resguardo con los proveedores.
2.- Atender los eventos que se presentan en los movimientos de transferencia de los herramentales.
3.- Atender arranques de proyectos debidos a transferencias con los proveedores.

Departamento de Ventas:

1.- Atender todos los herramentales de los productos que presentan la mejor relación costo / beneficio.
2.- Dar servicio a los herramentales que pertenecen a proyectos nuevos.
3.- Dar servicio a los herramentales a los que el cliente da seguimiento directo debido a antecedentes de falla.

Dirección General:

1.- Compromisos adquiridos por la Dirección.
2.- Planeación de actividades relacionadas con paros de producción o avances programados.
3.- Anticipación de fabricación para generar lotes de reserva.

Tipo de prioridad \ Departamento que la genera	Producción	Aseguramiento de Calidad	Desarrollo Técnico	Compras	Ventas	Logística y Almacenes	Ingeniería de Plásticos	Proveedores externos	Mantenimiento	Sistemas	Dirección
1.- Riesgo de no cumplir con el programa de entregas al cliente.	■										
2.- Baja existencia de producto en almacenes y en tránsito.	■					■					
3.- Baja disponibilidad de máquina para inyectar el producto.	■						■				
4.- Atención a reclamos del cliente.		■	■		■						
5.- Atención a problemas potenciales de calidad que ameritan solución inmediata.		■			■		■				
6.- Atención a problemas reportados en auditorias internas.		■	■		■						
7.- Cumplir con los compromisos adquiridos con el cliente: entrega de muestras, cumplimiento de fechas comprometidas, proyectos nuevos, arranques de producción, etc.			■		■						
8.- Participar en el desarrollo de aspectos de mejora en los productos.			■				■				
9.- Realizar modificaciones relacionadas con la reducción de costos.				■							
10.- Atender a los reclamos generados por problemas de calidad de los herramentales o moldes que se encuentran en resguardo de los maquiladores.				■		■					
11.- Atender a los eventos que se presentan en los movimientos de transferencia de los herramentales.				■		■		■			
12.- Atender arranques de proyectos debidos a transferencias con los proveedores.			■	■		■	■				
13.- Atender todos los herramentales de los productos que presentan la mejor relación costo / beneficio.					■		■				
14.- Dar servicio a los herramentales que pertenecen a proyectos nuevos.			■				■				
15.- Dar servicio a los herramentales a los que el cliente da seguimiento directo debido a antecedentes de falla o cambios.					■						
16.- Compromisos adquiridos por la dirección.											■
17.- Planeación de actividades relacionadas con paros programados.									■		
18.- Anticipación de fabricación para generar lotes de respaldo.	■	■	■			■					

Tabla 18.- Tabla de prioridades.

Para el manejo práctico de las prioridades se define agrupar a estas 18 indicadas en tres niveles:

P1 – Alta
P2 – Media
P3 – Baja o Normal

Según lo anterior, existen 18 tipos diferentes de prioridad bien identificados y establecidos para el desarrollo del trabajo del taller de moldes.

Cada una de estas prioridades, en su momento, deberá contar con el respaldo suficiente de información para ameritar el nivel de importancia que se le asigna.

Existen departamentos que únicamente se presentan con el fin de mencionarlos, al tiempo de señalar que no tienen relación directa con el taller.

4.3.5 ESCENARIOS DE TRABAJO.

La tabla anterior muestra la lista con las diferentes situaciones de trabajo que se llegan a presentar en el taller debido a las necesidades de cada uno de los departamentos de la empresa. Cada departamento indicará sus prioridades de acuerdo con la situación que se esté presentando en ese momento.

Por ejemplo, vamos a suponer que el lunes existía la necesidad del Departamento de Logística de producir partes con un molde, pues tienen bajas existencias. Se percibió que en el almacén de producto terminado alguien permitió la salida de partes sin haber hecho el registro debido y el sistema de conteo no consideró esa diferencia. Con lo anterior se corría el riesgo de parar la producción del cliente. El molde se encontraba en servicio y el taller programó sus actividades generando un plan de trabajo para cumplir con esta prioridad. El programa establecía que se iba a trabajar lunes, martes, miércoles y jueves para atender esa solicitud de servicio. El martes, día siguiente a la solicitud del Departamento de Logística, cuando apenas se tenía un avance del 20% de este trabajo, el Departamento de Calidad avisa que ese mismo día un auditor que visita la empresa requiere que se produzcan partes con un molde que no se ha utilizado desde hacía tres semanas, y que por lo tanto necesitaba de un servicio general. Para poder realizar ese servicio era necesario emplear a tres personas. En aquel momento solo había dos personas disponibles. La tercera, que llegó a cumplir con esta actividad, se encontraba trabajando con lo solicitado el día anterior por el Departamento de Logística.

El mismo martes el Departamento de Producción, tuvo una sesión de capacitación para sus supervisores quienes dejaron trabajando en automático una de las máquinas en la que falló un sensor de posición de una de las placas de expulsión de un molde. Lo anterior provocó que se rompiera un expulsor y se dañara una de las cavidades. Con este molde se había planeado entregar unas muestras al cliente, y el material se debía enviar por avión al día siguiente (miércoles) para cumplir con el compromiso. El Departamento de Desarrollo estuvo pendiente de este avance, y solicitó a la Dirección General su intervención, pues una falla en esa entrega prácticamente significaba perder proyectos futuros y negocios con el cliente. El Departamento de Ventas también intervino en este caso.

El miércoles, el trabajo de servicio al molde solicitado por el Departamento de Calidad el día anterior, se realizó sin problema. La auditoria resultó satisfactoria para el cliente. El Departamento de Calidad entonces se enfocó a atender sus propias prioridades. Se logró reparar el problema de la cavidad en el molde que se dañó en máquina y se cumplió con el compromiso de entrega de las piezas muestra. Sin embargo, el avance en el trabajo solicitado por el Departamento de Logística era apenas del 60% cuando ya se debía de estar terminando para entregarlo al día siguiente (jueves). El mismo miércoles a las cuatro de la tarde no surgió ninguna prioridad, lo que permitió avanzar y recuperar las actividades en atraso. Con ese fin se invirtieron 24 horas extras. Después de las cuatro de la tarde se comenzó a trabajar con un molde que llegó para darle servicio; el mecánico ajustador observó que tenía una fisura en una zona crítica. Dicha fisura debía repararse de inmediato para evitar que la parte sufriera un daño mayor. En este caso la prioridad se estableció por el mismo taller pues se tuvo idea de la magnitud del riesgo que se corría.

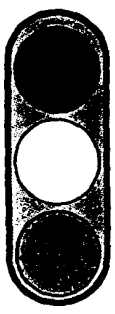
El resumen anterior, ilustra parte de la dinámica que se vive todos los días en el taller. Hay problemas que se presentan de manera fortuita, otros son evidenciados como situaciones de descuido, y en otros casos (la mayoría), se trata de solicitudes de trabajo derivadas de exigencias específicas de los clientes.

El nivel de las prioridades va a depender de los escenarios que se presenten en el momento en que aquellas se presentan. En el ejemplo anterior, se puede observar, que el escenario generado por la prioridad del trabajo que solicitó el Departamento de Desarrollo, hubiera sido completamente diferente si la Dirección General no hubiera intervenido. En ese momento se estaba trabajando con la prioridad del Departamento de Logística para evitar el paro de la producción de una línea del cliente.

En general, se pueden enmarcar cinco escenarios determinantes en el establecimiento de prioridades:

1.- La realización de auditorias por parte de las empresas certificadoras o los clientes.
2.- El arranque de un nuevo proyecto.
3.- Línea de trabajo establecida por la Dirección General.
4.- Producción normal.
5.- Problemas identificados por el taller y que ameritan especial atención.

Se toma como base la tabla inicial para establecer los diferentes escenarios y se señalan las actividades con los siguientes colores según su nivel de importancia:



Color Rojo - Alta Prioridad – E1

Color Amarillo – Prioridad Media - E2

Color Verde – Prioridad Normal – E3

De lo anterior, hay que mencionar que el taller tiene una lógica de trabajo que emplea esos colores, por ejemplo:

Las etiquetas de color rojo en un molde indican que el trabajo a realizar es crítico y que además se le deben realizar reparaciones para volver a utilizarlo en producción.

El color amarillo en las etiquetas colocadas en un molde, indica que se le deben realizar mantenimientos preventivos. No se trata de trabajos críticos, pero son importantes porque de ellos depende la integridad física de la herramienta, además de la calidad de las piezas que con él se producen.

Las etiquetas de color verde señalan que el molde se encuentra en buen estado, que terminó su corrida de producción sin problema, y que tal y como se encuentra, puede ser utilizado nuevamente en la máquina y comenzar a producir partes.

ESCENARIO 1.- La realización de auditorias por parte de las empresas certificadoras o los clientes. Departamento que la genera / Tipo de prioridad	Producción	Aseguramiento de Calidad	Desarrollo Técnico	Compras	Ventas	Logística y Almacenes	Ingeniería de Plásticos	Proveedores externos	Mantenimiento	Sistemas	Dirección
1.- Riesgo de no cumplir con el programa de entregas al cliente.	■										
2.- Baja existencia de producto en almacenes y en tránsito.	■					■					
3.- Baja disponibilidad de máquina para inyectar el producto.											
4.- Atención a reclamos del cliente.		■	■		■						
5.- Atención a problemas potenciales de calidad que ameritan solución inmediata.		■			■	■	■				
6.- Atención a problemas reportados en auditorias internas.		■	■		■						
7.- Cumplir con los compromisos adquiridos con el cliente: entrega de muestras, cumplimiento de fechas comprometidas, proyectos nuevos, arranques de producción, etc.											
8.- Participar en el desarrollo de aspectos de mejora en los productos.			■				■				
9.- Realizar modificaciones relacionadas con la reducción de costos.				■							
10.- Atender a los reclamos generados por problemas de calidad de los herramentales o moldes que se encuentran en resguardo de los maquiladores.											
11.- Atender a los eventos que se presentan en los movimientos de transferencia de los herramentales.				■		■		■			
12.- Atender arranques de proyectos debidos a transferencias con los proveedores.			■	■		■	■				
13.- Atender todos los herramentales de los productos que presentan la mejor relación costo / beneficio.					■		■				
14.- Dar servicio a los herramentales que pertenecen a proyectos nuevos.			■				■				
15.- Dar servicio a los herramentales a los que el cliente da seguimiento directo debido a antecedentes de falla o cambios.											
16.- Compromisos adquiridos por la Dirección.											■
17.- Planeación de actividades relacionadas con paros programados.									■		
18.- Anticipación de fabricación para generar lotes de respaldo.	■	■	■			■					

Tabla 19.- Escenarios de prioridades (del 1 al 5).

Para el manejo práctico de las prioridades se define agruparlas en 18, clasificadas en tres niveles:

E1 – Alta
E2 – Media
E3 – Baja o Normal

ESCENARIO 2.- El arranque de un nuevo proyecto. Departamento que la genera / Tipo de prioridad	Producción	Aseguramiento de Calidad	Desarrollo Técnico	Compras	Ventas	Logística y Almacenes	Ingeniería de Plásticos	Proveedores externos	Mantenimiento	Sistemas	Dirección
1.- Riesgo de no cumplir con el programa de entregas al cliente.	■										
2.- Baja existencia de producto en almacenes y en tránsito.	■					■					
3.- Baja disponibilidad de máquina para inyectar el producto.	■						■				
4.- Atención a reclamos del cliente.		■	■		■						
5.- Atención a problemas potenciales de calidad que ameritan solución inmediata.		■			■	■	■				
6.- Atención a problemas reportados en auditorias internas.		■	■		■						
7.- Cumplir con los compromisos adquiridos con el cliente: entrega de muestras, cumplimiento de fechas comprometidas, proyectos nuevos, arranques de producción, etc.			■		■						
8.- Participar en el desarrollo de aspectos de mejora en los productos.			■				■				
9.- Realizar modificaciones relacionadas con la reducción de costos.				■							
10.- Atender a los reclamos generados por problemas de calidad de los herramentales o moldes que se encuentran en resguardo de los maquiladores.				■		■					
11.- Atender a los eventos que se presentan en los movimientos de transferencia de los herramentales.				■		■		■			
12.- Atender arranques de proyectos debidos a transferencias con los proveedores.			■	■		■	■				
13.- Atender todos los herramentales de los productos que presentan la mejor relación costo / beneficio.					■		■				
14.- Dar servicio a los herramentales que pertenecen a proyectos nuevos.			■				■				
15.- Dar servicio a los herramentales a los que el cliente da seguimiento directo debido a antecedentes de falla o cambios.											
16.- Compromisos adquiridos por la Dirección.											■
17.- Planeación de actividades relacionadas con paros programados.									■		
18.- Anticipación de fabricación para generar lotes de respaldo.	■	■	■			■					

Tabla de prioridades.
(... continúa)

ESCENARIO 3.- Línea de trabajo establecida por la Dirección. Departamento que la genera / Tipo de prioridad	Producción	Aseguramiento de Calidad	Desarrollo Técnico	Compras	Ventas	Logística y Almacenes	Ingeniería de Plásticos	Proveedores externos	Mantenimiento	Sistemas	Dirección
1.- Riesgo de no cumplir con el programa de entregas al cliente.	■										
2.- Baja existencia de producto en almacenes y en tránsito.	■					■					
3.- Baja disponibilidad de máquina para inyectar el producto.	■						■				
4.- Atención a reclamos del cliente.		■	■		■						
5.- Atención a problemas potenciales de calidad que ameritan solución inmediata.		■			■	■	■				
6.- Atención a problemas reportados en auditorias internas.		■	■		■						
7.- Cumplir con los compromisos adquiridos con el cliente: entrega de muestras, cumplimiento de fechas comprometidas, proyectos nuevos, arranques de producción, etc.			■		■						
8.- Participar en el desarrollo de aspectos de mejora en los productos.			■				■				
9.- Realizar modificaciones relacionadas con la reducción de costos.				■							
10.- Atender a los reclamos generados por problemas de calidad de los herramentales o moldes que se encuentran en resguardo de los maquiladores.				■		■					
11.- Atender a los eventos que se presentan en los movimientos de transferencia de los herramentales.				■		■		■			
12.- Atender arranques de proyectos debidos a transferencias con los proveedores.			■	■		■	■				
13.- Atender todos los herramentales de los productos que presentan la mejor relación costo / beneficio.					■		■				
14.- Dar servicio a los herramentales que pertenecen a proyectos nuevos.			■				■				
15.- Dar servicio a los herramentales a los que el cliente da seguimiento directo debido a antecedentes de falla o cambios.					■						
16.- Compromisos adquiridos por la Dirección.											■
17.- Planeación de actividades relacionadas con paros programados.									■		
18.- Anticipación de fabricación para generar lotes de respaldo.	■	■	■			■					

Tabla de prioridades.
(... continúa).

ESCENARIO 4.- Producción normal. Departamento que la genera / Tipo de prioridad	Producción	Aseguramiento de Calidad	Desarrollo Técnico	Compras	Ventas	Logística y Almacenes	Ingeniería de Plásticos	Proveedores externos	Mantenimiento	Sistemas	Dirección
1.- Riesgo de no cumplir con el programa de entregas al cliente.	■										
2.- Baja existencia de producto en almacenes y en tránsito.	■					■					
3.- Baja disponibilidad de máquina para inyectar el producto.	■						■				
4.- Atención a reclamos del cliente.											
5.- Atención a problemas potenciales de calidad que ameritan solución inmediata.		■			■	■	■				
6.- Atención a problemas reportados en auditorias internas.											
7.- Cumplir con los compromisos adquiridos con el cliente: entrega de muestras, cumplimiento de fechas comprometidas, proyectos nuevos, arranques de producción, etc.											
8.- Participar en el desarrollo de aspectos de mejora en los productos.			■				■				
9.- Realizar modificaciones relacionadas con la reducción de costos.				■							
10.- Atender a los reclamos generados por problemas de calidad de los herramentales o moldes que se encuentran en resguardo de los maquiladores.											
11.- Atender a los eventos que se presentan en los movimientos de transferencia de los herramentales.				■		■		■			
12.- Atender arranques de proyectos debidos a transferencias con los proveedores.											
13.- Atender todos los herramentales de los productos que presentan la mejor relación costo / beneficio.					■		■				
14.- Dar servicio a los herramentales que pertenecen a proyectos nuevos.			■				■				
15.- Dar servicio a los herramentales a los que el cliente da seguimiento directo debido a antecedentes de falla o cambios.											
16.- Compromisos adquiridos por la Dirección.											■
17.- Planeación de actividades relacionadas con paros programados.									■		
18.- Anticipación de fabricación para generar lotes de respaldo.											

Tabla de prioridades.
(... continúa).

ESCENARIO 5.- Problemas identificados por el taller y que ameritan especial atención. Departamento que la genera / Tipo de prioridad	Producción	Aseguramiento de Calidad	Desarrollo Técnico	Compras	Ventas	Logística y Almacenes	Ingeniería de Plásticos	Proveedores externos	Mantenimiento	Sistemas	Dirección
1.- Riesgo de no cumplir con el programa de entregas al cliente.	■										
2.- Baja existencia de producto en almacenes y en tránsito.	■					■					
3.- Baja disponibilidad de máquina para inyectar el producto.	■						■				
4.- Atención a reclamos del cliente.		■	■		■						
5.- Atención a problemas potenciales de calidad que ameritan solución inmediata.		■			■	■	■				
6.- Atención a problemas reportados en auditorias internas.		■	■		■						
7.- Cumplir con los compromisos adquiridos con el cliente: entrega de muestras, cumplimiento de fechas comprometidas, proyectos nuevos, arranques de producción, etc.			■		■						
8.- Participar en el desarrollo de aspectos de mejora en los productos.			■				■				
9.- Realizar modificaciones relacionadas con la reducción de costos.				■							
10.- Atender a los reclamos generados por problemas de calidad de los herramentales o moldes que se encuentran en resguardo de los maquiladores.				■		■					
11.- Atender a los eventos que se presentan en los movimientos de transferencia de los herramentales.				■		■		■			
12.- Atender arranques de proyectos debidos a transferencias con los proveedores.			■	■		■	■				
13.- Atender todos los herramentales de los productos que presentan la mejor relación costo / beneficio.					■		■				
14.- Dar servicio a los herramentales que pertenecen a proyectos nuevos.											
15.- Dar servicio a los herramentales a los que el cliente da seguimiento directo debido a antecedentes de falla o cambios.											
16.- Compromisos adquiridos por la Dirección.											■
17.- Planeación de actividades relacionadas con paros programados.									■		
18.- Anticipación de fabricación para generar lotes de respaldo.	■	■	■			■					

Tabla de prioridades.
(... continúa)

4.3.6 CONSIDERACIÓN DE LA VARIABLE "HABILIDAD".

La segunda variable en importancia que aplica en un sistema de este tipo es la variable "habilidad", refiriéndose a la habilidad del operador para resolver el problema.
Si la prioridad de la tarea es alta, es claro que para su desarrollo se deberá asignar a uno de los mejores operadores o a los operadores con mayor habilidad.

Si la prioridad de la tarea es baja o media, se podrán asignar operadores de habilidad baja a media.

La habilidad se representará por los tres valores siguientes:

H1 – Habilidad alta
H2 – Habilidad media
H3 – Habilidad baja

Por lo tanto, el patrón de codificación después de considerar las variables de "prioridad" y de "habilidad", queda de la siguiente forma::

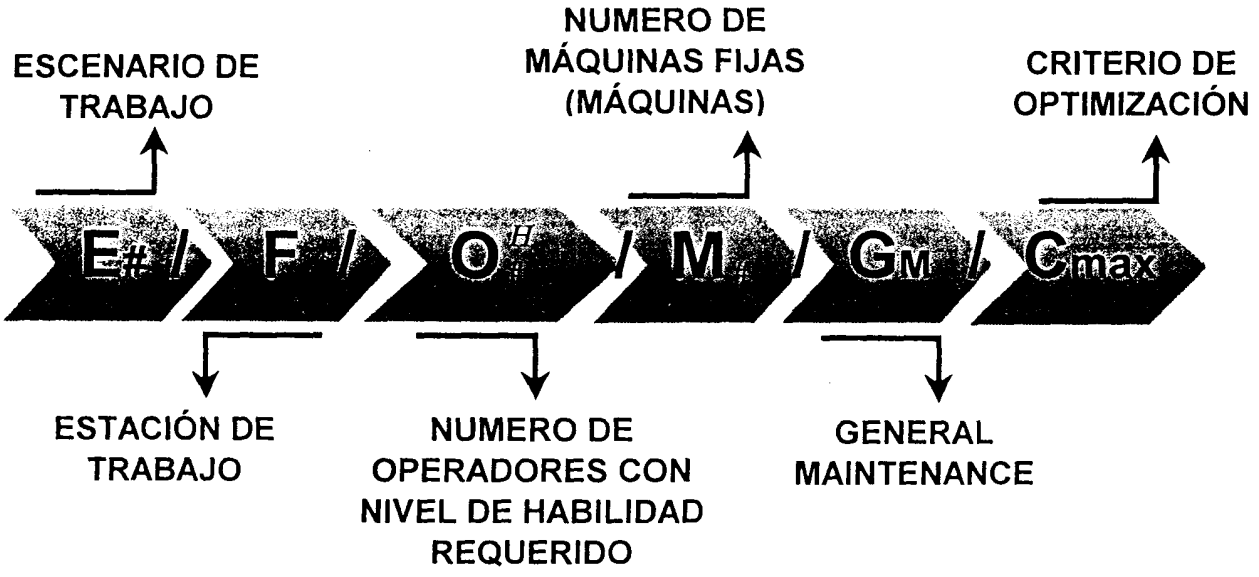


Fig. 19.- Patrón base de codificación considerando las variables "prioridad" y "habilidad".

Tabla 20.- Grupo de fallas considerando la prioridad del trabajo y la habilidad de los operadores.

GRUPO DE FALLAS CONSIDERANDO PRIORIDAD DEL TRABAJO Y HABILIDAD DE LOS OPERADORES

1E1 A O$^{1}_{2}$ 1E1 H O$^{1}_{1}$ M$_{1}$	A O$^{1}_{1}$ M$_{1}$ E O$^{1}_{1}$ M$_{1}$	F O$^{3}_{2}$ M$_{2}$	A O$^{1}_{1}$ M$_{1}$	A O$^{1}_{2}$	A O$^{3}_{1}$ FALLA 1 1 36 08 (CORONAS O PORTAFOCOS FISURADOS) MOLDE BISEL MB MOPF 223 157 00 1
1E2 A O$^{3}_{2}$	C O$^{3}_{1}$ M$_{1}$	A O$^{3}_{1}$			FALLA 1 1 02 02 (CON RADIO GOLPEADO O DEFORME) MOLDE REFLECTOR A4 963 643 00 1
2E2 A O$^{1}_{1}$ 2E2 I O$^{1}_{1}$	A O$^{1}_{1}$ M$_{1}$	E O$^{2}_{1}$ M$_{1}$	B O$^{2}_{1}$ M$_{1}$	A O$^{3}_{1}$	FALLA 1 1 39 04 (PLACA FLOTANTE CON TIRANTES DAÑADOS) MOLDE MICA MOPF 223 359 00 1
2E1 A O$^{3}_{2}$ 2E1 I O$^{3}_{1}$	D O$^{3}_{1}$	A O$^{3}_{2}$			FALLA 1 3 03 02 (RESISTENCIA ABIERTA) MOLDE MICA PT44 223 011 00 1
3E2 A O$^{3}_{2}$ 3E2 I O$^{3}_{1}$	F O$^{3}_{2}$ M$_{2}$	B O$^{3}_{1}$ M$_{1}$	A O$^{3}_{2}$		FALLA 1 1 19 01 (EXPULSORES ROTOS) MOLDE MICA FACE LIFT 224 751 00 1
1E3 A O$^{3}_{2}$					FALLA 1 1 07 01 (CAVIDAD CON RAYAS) MOLDE MICA VENTO A4 963 673 00 1
2E3 A O$^{3}_{1}$	A O$^{1}_{1}$ M$_{1}$	E O$^{1}_{1}$ M$_{1}$	B O$^{2}_{1}$ M$_{1}$	A O$^{3}_{1}$	FALLA 1 1 37 10 (LIFTER DEFORME) MOLDE MICA UTILITY 222 997 01 1

En un dia normal, veríamos representada la carga de trabajo del día en una tabla como la anterior, pero con aproximadamente 90 órdenes (que equivaldrían a 720 líneas con diferentes actividades, niveles y prioridades) generadas por igual número de fallas.

Algunas actividades se realizan de forma seriada mientras otras se realizan de forma paralela.

En el arreglo anterior se muestra que los recursos utilizados para resolver las fallas, dependen de los escenarios en los que se presenten. Del escenario, dependerá la cantidad de operarios y máquinas a utilizar, así como las habilidades requeridas según la tabla anexa:

E MENOR ⇒ **E** MAYOR	**H** MENORES	⇒	**H** MAYOR DISPONIBLE
	H MAYOR	⇒	**Constante**
E MAYOR ⇒ **E** MENOR	**H** MAYOR	⇒	**H** MENOR DISPONIBLE
	H MENOR	⇒	**Constante**

ESCENARIO	PROBLEMA ⇒ SOLUCIÓN
Producción Normal (3)	113608 ⇒ $\mathbf{AO_1^1 - AO_1^1\ M_1 - FO_2^3\ M_2}$
	110202 ⇒
	113904 ⇒
Auditoria por certificación (1)	121504 ⇒

De la Tabla 20, podemos ver que para resolver la falla 1 1 36 08 del molde bisel MOPF 223 157 necesitamos contar con el apoyo de:

1.- Dos operadores de la estación A con habilidad 1 (durante 16 horas ambos y 13 horas uno de ellos) y un operador con habilidad 3 (durante 1 hora).
2.- Dos operadores de la estación F con habilidad 3 (durante 2 horas ambos).
3.- Un operador de la estación H con habilidad 1 (durante 4 horas).
4.- Un operador de la estación E con habilidad 1 (durante 6 horas).

Lo anterior es con relación a los obreros. En relación con la maquinaria, se requiere de lo siguiente:

1.- Dos máquinas de la estación A (una durante 3 horas y una durante 10 horas).
2.- Dos máquinas de la estación F (durante 4 horas).
3.- Una máquina de la estación H (durante 4 horas).
4.- Una máquina de la estación E (durante 6 horas).

No hay que olvidar que todo lo anterior se lleva a cabo con algunas actividades seriadas; es decir, cada actividad se realiza una tras otra debido a que para iniciar una, requiere estar terminada la anterior. Y hay actividades que se realizan en forma paralela, con secuencia seriada.

De igual forma, es necesario recordar que en este caso estamos hablando de una serie de actividades que estan enfocadas a resolver unicamente una sola falla, y que esa falla tiene una prioridad ya establecida para su solución por el escenario en curso. ¿Qué va a suceder cuando tengamos un número más amplio de fallas por resolver y cada una de ellas presente prioridades diferentes?, con esta pregunta se puede imaginar la dificultad que presenta el sistema para la resolución eficiente de problemas.

4.3.7 LA VARIABLE "TIEMPO".

La variable "tiempo" se menciona, pero no se incluye en este análisis debido a que el tema del trabajo no lo cubre. La inclusión de esta variable se hará cuando se trate de la optimización y de la forma de reducir tiempos. En tal caso, la prioridad será obtener un modelo que nos permita simular el sistema en cuanto a modo y forma. Sin embargo, como base para análisis posteriores, se puede decir que la correcta definición y determinación de la variable "tiempo" se basa en:

1.- La estandarización de tiempos y movimientos en cada una de las actividades desarrolladas por los operadores en las estaciones de trabajo.

2.- El establecimiento de las capacidades de cada una de las estaciones de trabajo en tiempo (horas máquina y horas hombre).

Sin duda el tiempo es una de las variables que más problemas tiene en su definición. A manera de resolver el problema, podemos hacer los siguientes cuestionamientos:

1.- ¿Cómo podemos asegurar que el operador uno realice siempre en el mismo tiempo la tarea A?

2.- Una vez que el operador uno ha estandarizado sus tiempos con la tarea A, ¿Cómo podemos asegurar que el operador dos emplee el mismo tiempo que el operador uno? Y así sucesivamente.

Existen diferentes técnicas de estandarización de tiempos y movimientos para la realización de tareas. Entre ellas, la que más recientemente se busca implementar en diversos lugares de trabajo, es la técnica de las 5 S´s. Esta técnica consiste en aplicar en el lugar de trabajo cinco etapas de desarrollo que permitirán estandarizar un sistema y mantenerlo vigente.

Más que la aplicación de una técnica, la aplicación de las 5 S´s consiste en implementar una filosofía de vida y de trabajo. Como en toda filosofía de vida, es necesario erradicar vicios y malos hábitos que se vuelven costumbres con el paso del tiempo. Las 5 S´s en orden de aplicación son:

1ª S.- Selección. Consiste en seleccionar todas las cosas que sirven de las que no sirven. Hacer esta selección es la base para poder continuar con las S´s posteriores. Es importante ser determinante en la decisión de la selección. Es difícil deshacerse de cosas que se han mantenido durante mucho tiempo, aunque no se utilicen.

2ª S.- Orden. Una vez que se ha asegurado contar únicamente con las cosas que sirven, se procede a ordenarlas de tal manera que cada cosa tenga su lugar. El lugar para cada cosa deberá ser establecido estratégicamente de manera que se permita tener un fácil acceso a ellas. Es común que las cosas que se utilizan con mayor frecuencia se coloquen en lugares más accesibles.

3ª S.- Limpieza. Una vez que la selección y el orden se han "apoderado" del lugar de trabajo, se procede a mantenerlo limpio. La limpieza es el mejor medio de contraste que permite detectar cualquier problema de orden y malos funcionamientos.

4ª S.- Estandarización. La estandarización no se puede llevar a cabo si mantenemos cosas inservibles entre las que son útiles, si mantenemos en desorden y sucio un lugar de trabajo. Una vez que se han logrado implementar las tres primeras S´s, la estandarización es sólo cuestión de realizar un análisis más profundo de las tareas cotidianas: ¿Cuántas veces al día utilizo esta herramienta? ¿Qué movimientos necesito para realizar este trabajo? ¿Es posible reducir el tiempo utilizando una herramienta optimizada y cambiando los movimientos?, etc.

5ª S.- Mejora continua. Una vez que se inicia con la estandarización, seguramente va a ser necesario nuevamente seleccionar cosas que ya no son útiles, hay que ordenarlas otra vez y realizar la rutina de limpieza que termina por ser un mantenimiento obligado. En automático se vuelve a pasar a la estandarización. ¿Cuál será el paso siguiente?... Desde luego que la mejora continua y/o la revisión del sistema.

La combinación de diferentes técnicas de optimización y estandarización puede resultar muy provechosa si se aplican en paralelo, o bien, una apoyándose en los logros de la otra. Por ejemplo, en el caso del taller de mantenimiento de moldes de inyección, se ha venido trabajando con las 5 S's pensando en formar con esta técnica bases sólidas que permitan la aplicación de SMED (Single Minute Exchange of Dies) también conocido como cambio rápido de herramientas.

4.3.8 CASO DE APLICACIÓN DE LOS DIFERENTES ESCENARIOS DE TRABAJO.

La Tabla 21 muestra el programa de trabajo del taller para trabajar con siete fallas diferentes. En promedio y normalmente se trabaja con 37 fallas al mismo tiempo. La asignación de prioridades se hace tomando en cuenta que se está trabajando en las condiciones que marca el escenario 1; es decir, que en ese momento en la empresa se está llevando a cabo una auditoria por parte de alguna empresa certificadora o por parte de alguno de los clientes. Todas las decisiones que se tomen dependen de esta condición.

Estableciendo prioridades y distribuyendo recursos (ver tabla 19), se decide dar la prioridad número uno a la reparación de la falla 1 1 36 08, debido a que la empresa recibió un reclamo por parte de uno de sus clientes y la solicitud de reparación fue hecha por el Departamento de Aseguramiento de Calidad.

Para resolver la falla que tiene la prioridad número uno, se necesita en la primera etapa del trabajo, a dos operadores de la estación A que tengan habilidad uno, y de la estación H a un operador con habilidad uno, además de una máquina. De esta manera se asignan los recursos de cada estación de trabajo para poder resolver las fallas ordenadas por las demás prioridades.

La solución de la falla 1 1 02 02 tiene prioridad dos porque fue solicitada por el Departamento de Desarrollo Técnico (también marcada en la tabla 19 como "alta") debido a que en la auditoria se detectó un problema potencial de calidad que necesitaba solución inmediata.

Para cada escenario, la información indicada en la tabla 19 es la base para llevar a cabo la organización y la asignación de las prioridades. La prioridad tres se asigna a la reparación de la falla 1 1 39 04 porque fue solicitada por el Departamento de Producción debido a que tenia baja disponibilidad de máquina para inyectar el producto.

Tabla 21.- Grupo de fallas ordenadas según su prioridad y el escenario bajo el que se desarrolla el trabajo.

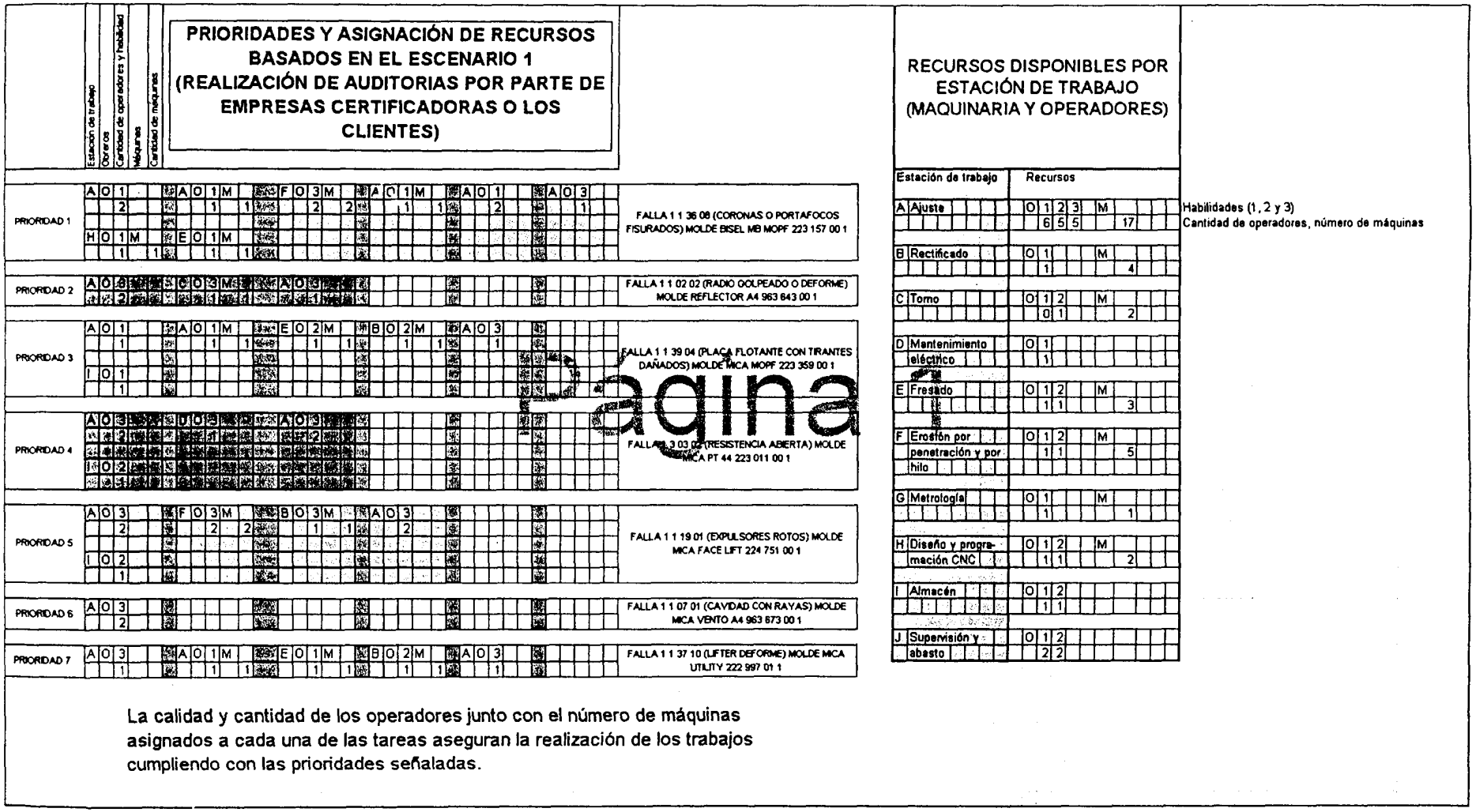
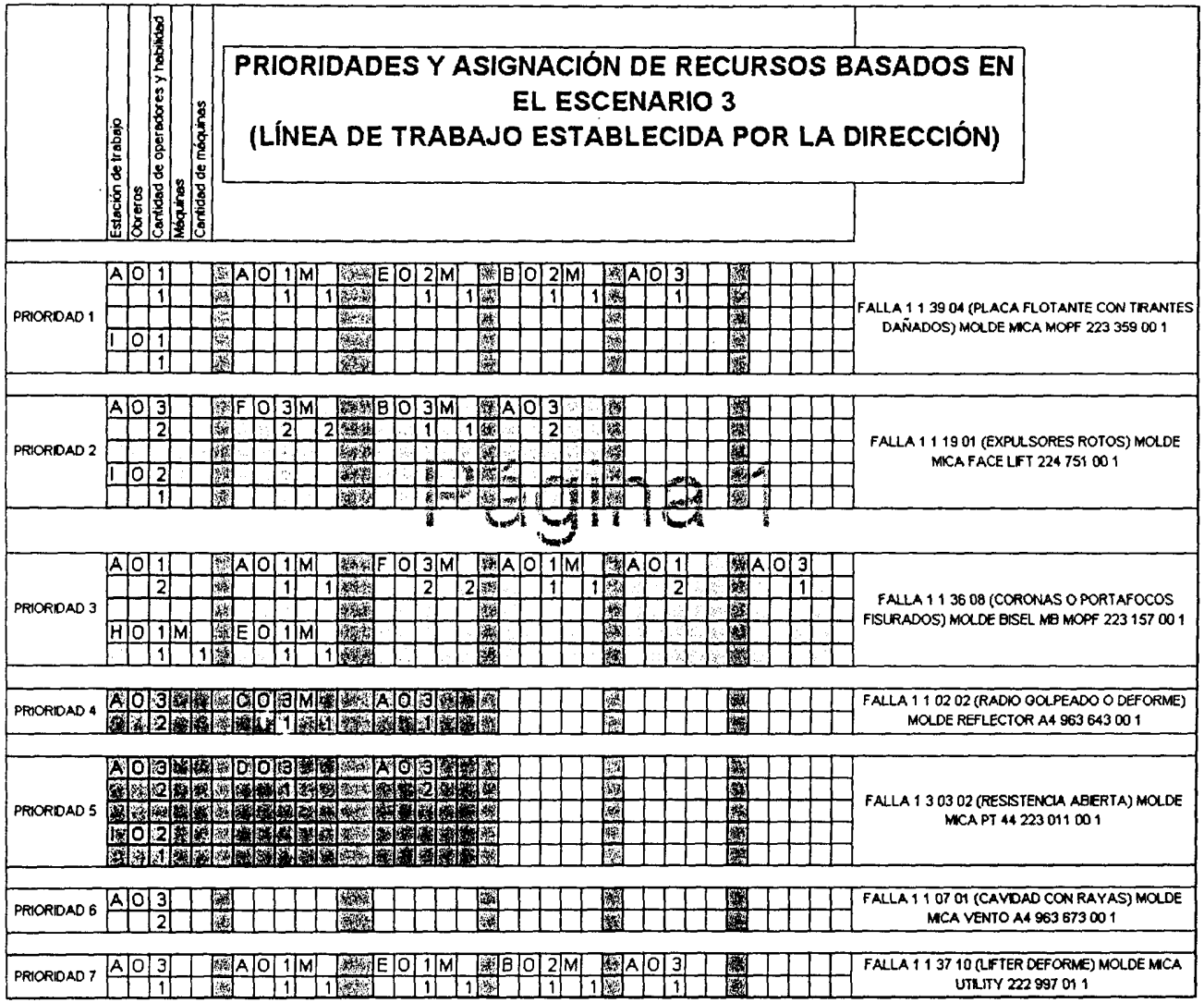


Tabla 22.- Nueva asignación de recursos según el cambio de escenario.



La prioridad cuatro se asignó a la solución de la falla 1 3 03 02 debido a que fue solicitada por el Departamento de Ventas para poder cumplir con algunos compromisos adquiridos con el cliente. Este departamento debía entregar muestras de uno de los productos.

La reparación del resto de las fallas fue solicitada por los Departamentos de Ingeniería de Plásticos y Producción, en condiciones tales que las ubican en el nivel de prioridad de baja a normal.

En la tabla 21, del lado derecho, se encuentra un recuadro en donde se presentan los recursos de los que dispone cada estación de trabajo. Por ejemplo, la estación de trabajo E, que corresponde a fresado, cuenta únicamente con un operador que tiene habilidad uno y otro con habilidad dos, y con tres máquinas fresadoras.

Como se indica, todos los recursos se distribuyen de tal manera que se pueda cumplir el objetivo de resolver lo más pronto posible la falla 1 1 36 08. Esta decisión se tomó basándose en el análisis de la tabla 19 y el arreglo se presenta en la tabla 21.

Después de haberse presentado diferentes condiciones de trabajo, el escenario ha cambiado. Se han suscitado negociaciones y arreglos ajenos al taller y la Dirección General ha intervenido en la toma de varias decisiones. Ahora, el escenario vigente es el número tres, el cual corresponde a la línea de trabajo establecida por la Dirección General.

Las nuevas prioridades se basan en lo indicado en la tabla 19 presentándose los cambios siguientes:

La prioridad inicial...	pasa a ser ahora...	la prioridad actualizada
1 ⇒ 3		
2 ⇒ 4		
3 ⇒ 1		
4 ⇒ 5		
5 sin cambio		
6 sin cambio		
7 sin cambio		

De igual forma, se podrían presentar cambios en la asignación de recursos. Este caso no se presenta en las tablas; sin embargo, es importante considerarlo dentro de las posibilidades de trabajo en el sistema.

5. CONCLUSIONES.

En este trabajo se ha expuesto la tendencia que ha mostrado la economía mexicana: de depender exclusivamente de los ingresos del petróleo en las últimas dos décadas ha centrado su productividad en la industria.

La industria, como sabemos implica además de innovaciones tecnológicas, la optimización que se hace patente en diferentes rubros de la misma: mayor productividad en menor tiempo, mayor productividad con menos personal, mayor productividad con menos gastos. En suma, mayor productividad que persigue ganancias empresariales y satisfacción del cliente.

En este marco, el presente trabajo ha hecho un análisis de la metodología que permite lograr esa productividad al interior del taller de mantenimiento de moldes de inyección de plástico. Dicha metodología persigue como objetivo principal ilustrar las dificultades sistemáticas que representa mantener trabajando a 52 máquinas de inyección de plástico con las que cuenta la empresa, que no son otra cosa que la primer parte de un proceso tecnológico que culmina con la venta de unidades en una agencia automotriz.

Se juzgó importante, además del desarrollo teórico para la modelación de un taller de mantenimiento de moldes de inyección de plástico, aportar la experiencia que complementa la propuesta y los objetivos del presente trabajo de investigación.

Las variables y el análisis tanto del sistema como del entorno desarrollados para la modelación el taller, exigió el diseño de diferentes esquemas con escenarios diversos. Si bien, la teoría para el desarrollo de modelos es ya conocida en los medios de investigación, la teoría sobre el desarrollo de modelos de talleres de mantenimiento como el que aquí se analizó, es escasa.

La investigación bibliográfica vinculada con talleres de mantenimiento es limitada, y lo más aproximado se encontró en reportes de convenciones y eventos de ingeniería en el extranjero (principalmente en Estados Unidos con investigadores de este país, Taiwán y la India).

Adicionalmente el aporte de este trabajo consiste en el desarrollo de las bases sistematizadas que permitirán desarrollar trabajos posteriores vinculados a esta temática.

De manera particular, entre los resultados que arrojó la investigación, tenemos que la identificación de las funciones del taller y la identificación de las entidades, permitieron ubicar con claridad los alcances del sistema y relacionarlo con la teoría del desarrollo de modelos.

La identificación de funciones se vincula con la determinación a detalle de los puntos críticos de los trabajos realizados y el establecimiento de las prioridades del trabajo.

La identificación de funciones, obligó a detectar y clasificar los tipos de fallas que se presentan en los moldes y a establecer la forma concreta de corregir cada falla. Aun es necesario desarrollar el método ideal de solución de una falla concreta, aplicando técnicas de análisis de tiempos y movimientos; no obstante, las bases están desarrolladas en la presente investigación. Por ejemplo, se ubicaron cerca de 400 tipos de fallas diferentes para 80 componentes comunes en los moldes de inyección de plásticos.

El correcto manejo de prioridades fue uno de los temas en donde este trabajo obtuvo logros importantes. Fuente de estrés, malos entendidos, resultados inesperados y frustraciones constantes, han quedado *encapsulados* en un esquema de escenarios que comprenden la mayor cantidad de combinaciones posibles ¿Cómo manejar las situaciones en las que por la mañana se señala una determinada prioridad enfocándose a ella todos los recursos, y por la tarde lo inicialmente señalado es ya secundario, pues existen nuevas prioridades? La respuesta a esta pregunta se obtiene a partir de lo que se desarrolló en esta investigación: analizar las situaciones posibles, caracterizarlas y jerarquizarlas en prioridades que aseguren cumplir con los objetivos del taller. Con lo anterior queda manifiesta que la finalidad del taller es trabajar de conjunto en beneficio del grupo.

Por su parte, la identificación de las entidades es de capital importancia. En ella hay que considerar al personal operativo (con sus habilidades) y las estaciones de trabajo (integradas por maquinaria y equipo). Esta identificación permite concluir que en un sistema de este tipo, las habilidades del personal operativo son parte de las variables críticas. Dichas variables deben distinguirse de partes que no son prioritarias al interior del sistema.

A pesar de que el tema de las habilidades del personal operativo por sí mismo requiere de un tratamiento especializado, en esta investigación se estableció la estructura de clasificación del personal que se utiliza como base en el taller. Se generó también a partir de este punto, una matriz de capacitación que permite evaluar las capacidades del personal operativo a través de un método estructurado y que sirve para programar cursos de forma personalizada (es decir, una capacitación orientada a cada elemento operativo que evite masificar la capacitación y pase por alto las necesidades individuales) poco frecuente en talleres de este tipo. Asimismo,

se desarrolló una estructura de organización que permitió cubrir el mayor tiempo posible los horarios de servicio del taller con la cantidad de personal disponible.

La caracterización de las estaciones de trabajo permitió conocer con más precisión la capacidad que tiene cada una de ellas para cumplir con cierta carga de trabajo. Ahora, con base en este análisis se pueden programar las prioridades y los tiempos de entrega para apoyar al área de ajuste y comprometer fechas de entrega más próximas a la realidad.

Con el fin de estructurar y armar el esquema de modelación con la información previamente recopilada, se realizaron seis diferentes esquemas antes de encontrar el que mejor representaba al sistema con las variables consideradas (estación de trabajo con su maquinaria, personal operativo y escenario de trabajo).

Una vez establecido el esquema más apropiado, se procedió a trabajar con su estructura para obtener un listado representativo de fallas y soluciones con el objeto de generar un algoritmo sencillo de trabajo que permita su aplicación práctica.

Es importante señalar que esta investigación tuvo una delimitación precisa, aun cuando generó actividades adicionales que por su extensión y colateralidad con el tema no fue posible desarrollar con toda amplitud. Sin embargo, hay que destacar lo mencionado al principio de estas conclusiones, la optimización de los sistemas productivos incluye también a un área muy estratégica en el proceso productivo: el taller de mantenimiento de los moldes de inyección de plástico.

6. BIBLIOGRAFÍA.

[1] J. Adams. E. Balas, and D. Zawack. "The shifting bottleneck procedure for job shop scheduling," *Management Sci.*. vol. 34, no. 3, pp. 391-401, Mar. 1988.

[2] J. E. Ashton, and F. W. Cook. Jr., "Time to reform job shop manufacturing." *Harvard Bus. Rev.*, pp. 106-111, Mar.-Apr. 1989.

[3] K. R. Baker and J. W M. Bertrand, "A comparison of due-date selection rules." *Amer. Inst. Indust. Eng. Trans.* vol. 13, no. 2, pp. 123-131, June 1981.

[4] D P Bertsekas, *Constrained Optimization and Lagrange Multiplier Methods* New York: Academic. 1982.

[5] D. P. Bertsekas and J. N. Tsitsiklis, *Parallel and Distributed Computation: Numerical Methods.* Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall. 1989.

J. H Blackstone, D. T. Phillips, and G. L. Hogg, "A state-of-the-art survey of dispatching rules for manufacturing job shop operations," *Int. J. Production Res.*, vol. 20, pp. 27-45, Jan. 1982.

N. T. Bruvold and J. R. Evans, "Flexible mixed-integer programming formulations for production scheduling problems," *IIE Trans.* vol. 17, no. 1, pp. 2-7, Mar. 1985.

J. Carlier and E. Pinson, "An algorithm for solving the job-shop problem." *Manag. Sci.*, vol. 35, no. 2, pp. 164-176, Feb. 1989.

R. Contemo and Y. C. Ho, "Order scheduling problem in manufacturing systems," *Int. J. Production Res.* vol. 26, no. 9, pp. 1487-1510, Sept. 1988.

[10] N. H. Cook, "Computer-managed parts manufacture," *Sci. Amer.*, vol. 232, no. 2, pp. 22-28,1975.

[11] H. Everett. "Generalized Lagrange multiplier method for solving problems of optimum allocation of resources." *Operations Res.,* vol. 11, pp. 399-417. 1963.

M. L. Fisher, "Optimal solution of scheduling problems using Lagrange multipliers, Pan I," *Operations Res.,* vol. 21, pp. 1114-1127. 1973.

-. "Lagrangian relaxation method for solving integer programming problems." *Manog. Sci.,* vol. 27, pp. 1-18, 1981.

M. L. Fisher, B. J. Lageweg. J. K. Lenstra. and A. H. G. Rinnooy Kan. "Surrogate duality relaxation for job shop scheduling," *Discrete Appl. Math.,* vol. 5, pp. 65-75, Jan. 1983.

[15] M. L. Fisher, R. Jaikumar, and L. N. Van Wassenhove, "A multiplier adjustment method for the generalized assignment problem." *Manag. Sci.,* vol. 32, pp. 1095-1103, 1986.

[16] M.S. Fox and S.F. Smith, "ISIS-A knowledge-based system for factory scheduling." *Expert Syst.,* vol. 1, pp. 25-49, 1984.

[17] S.C. Graves, "A review of production scheduling," *Operations Res.,* vol. 18, pp. 841 852, 1981.

[18] A. M. Geoffrion, "Lagrangean relaxation for integer programming." *Math. Programm. Study,* vol. 2. pp. 82-114, 1974.

[19] M. Held and R. M. Karp. "A dynamic programming approach to sequencing problems." *J. Soc. Indust. Appl. Math.,* vol. 10, pp. 19&-210. 1962.

[20] D J Hoitomt, P. B. Luh, E. Max, K. R. Pattipati, "Scheduling jobs with simple precedence constraints on parallel machines," *IEEE Contr. Syst. Mag.,* vol. 10, no. 2, pp. 34-40, 1990; also in *Dynamics of Discrete Event Systems,* Y. C. Ho. Ed. Piscataway. NJ: IEEE Press, 1992, pp. 271-277.

[21] D. J. Hoitomt, P. B. Luh, K. R. Pattipati, "Job shop scheduling with simple precedence constraints," in *Proc. Automat. Contr. Con!* (San Diego, CA, May 1990), pp. 1-6.

[22] D. J. Hoitomt, J. B. Perkins, and P. B. Luh, "Distributed scheduling of job shops." in *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics Automat.* (Sacramento, CA, Apr. 1991), pp. 1067-1072.

[23] A. Kuziak, *Intelligent Manufacturing Systems.* Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1990.

J. K. Lenstra, A. H. G. Rinnooy Kan, and P. Brucker, "Complexity of machine scheduling problems," *Ann. Discrete Math.,* vol. 7, pp. 343-362,1977.

J. K. Lenstra and A. H. G. Rinnooy Kan, "Complexity of scheduling under precedence constraints." *Operations Res.,* vol. 26, no. 1, pp. 22-35, Jan.-Feb. 1978.

[26] D. G. Luenberger, *Linear and Nonlinear Programming,* 2nd ed. Reading, MA Addison-Wesley, 1984.

[27] P. B. Luh, D. J. Hoitomt, E. Max, and K. R. Pattipati, "Schedule generation and reconfiguration for parallel machines," *IEEE Trans. Robotics Automat.,* vol. 6, no. 6, pp. 687-696, Dec. 1990.

J. H. Matthews, *Numerical Methods.* Englewood Cliffs, NJ: Prentice- Hall, 1987.

[29] K. N. McKay, F. R. Safayeni, and J. A. Buzacott, "Job-shop scheduling theory: What is relevant?" *Interfaces,* vol. 18, pp. 84-90, July/Aug. 1988.

M. I. Norbis and J.M. Smith, "'Two level heuristic for the resource constrained scheduling problem." *Int. J. Production Res.,* vol. 24, pp. 1203-1219, 1986.

P. S. Ow, S. F. Smith, and R. Howie, "A cooperative scheduling system," in *Proc. 2nd Int. Conf. Expert Syst. Leading Edge* in *Production Planning Contr.* (Charleston, SC, May 1988).

[32] K. R. Pattipati *et al.,* "CONFIDANTE: A computer-based design aid for the optimal synthesis, analysis and operation of maintenance facilities." in *Proc. IEEE AUTOTESTCON,* Nov. 1984.

[33] B. T. Polyak, "Minimization of unsmooth functionals." *USSR Comput. Math. Math. Phys.,* vol. 9, pp. 14-29, 1969.

N. Z. Shor, "On the structure of algorithms for the numerical solution of optimal planning and design problems." Ph. D. dissertation, Cybernetics Inst., Academy of Sciences, USSR, 1964.

F. Viviers, "A decision support system *for* job shop scheduling," *European J. Operational Res.,* vol. 14, no. 1, pp. 95-103, Sept. 1983.

[36] K. P. White, Jr., "Advances in the theory and practice of scheduling," in *Advances* in *Industrial Systems, Control and Dynamic Systems,* vol. 37, C. T. Leondes, Ed. San Diego, CA: Academic, 1990, pp. 115-158.