



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

---

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN  
INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA

“CONFIGURACIÓN DE MAQUINARIA ASISTIDA POR  
COMPUTADORA ”

**T E S I S**

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

**DOCTOR EN INGENIERÍA**

ING. MECÁNICA

P R E S E N T A:

**MIGUEL ÁNGEL FLORES RENTERÍA**



TUTOR:  
DR. VICENTE BORJA RAMÍREZ

2006

**JURADO ASIGNADO:**

Presidente:	Dr. López Parra Marcelo
Secretario:	Dr. Santillán Gutiérrez Saúl Daniel
1 <sup>er</sup> Vocal:	Dr. Borja Ramírez Vicente
2 <sup>do</sup> Vocal:	Dr. Dorador Gonzáles Jesús Manuel
3 <sup>er</sup> Vocal:	Dr. Reivich Ramírez Alejandro
1 <sup>er</sup> Suplente:	Dr. Kussul Mikhailovich Ernst
2 <sup>do</sup> . Suplente:	Dr. Barba Pingarron Arturo

Ciudad Universitaria, México D. F., Junio de 2006

**TUTOR DE TESIS:**

Dr. Vicente Borja Ramírez

---

**FIRMA**

## **DEDICATORIA**

### **A mis padres.**

Con admiración y respeto por su esfuerzo, sacrificio y amor que me han dado durante tantos años.

### **A mis hermanos.**

Por sus consejos, apoyo y cariño.

---



---

**ÍNDICE**

<b>Capítulo 1 Antecedentes</b>	<b>1</b>
1.1 Antecedentes de modelos de información	2
1.1.1 El modelado de la información	2
1.1.2 Arquitecturas y modelos de empresas	3
1.1.3 MOSES ( <i>Sistema de Modelado Orientada a Ingeniería Simultánea</i> )	8
1.2 Antecedentes de la configuración de maquinaria	9
1.2.1 La selección de herramientas de corte.	10
1.2.2 Condiciones de operación	11
1.2.2 Selección de máquinas	12
1.2.3 Sistemas CAPP (Planeación de Procesos Asistida por Computadora)	13
1.3 Antecedentes de inteligencia artificial y sus técnicas	15
1.3.1 Sistemas Expertos	15
1.3.2 Redes neuronales artificiales (RNA)	17
1.3.3 Lógica difusa (LD)	20
1.3.4 Algoritmos genéticos (GA)	20
1.3.4.1 Optimización de múltiples objetivos	23
1.4 Integración de los elementos en la configuración de maquinaria	23
1.5 Comentarios	24
<b>Capítulo 2 Objetivos y fundamentos de la tesis</b>	<b>27</b>
2.1 Intención de la investigación	28
2.2 Objetivos	28
2.3 Aportaciones	28
2.4 Alcances del proyecto	29
2.5 Metodología	30
<b>Capítulo 3 La configuración de maquinaria</b>	<b>33</b>
3.1 La configuración de maquinaria.	34
3.2 El proceso de configuración de maquinaria	36

---

3.3	Desarrollo de funciones del proceso de configuración de maquinaria.	39
3.3.1	Función A1. Representar información	39
3.3.2	Función A2. Determinar áreas de trabajo	40
3.3.2.1	Red <i>back propagation</i>	41
3.3.2.2	Implementación de la red neuronal en la determinación de las áreas de trabajo	42
3.3.3	Función 3. Determinación de recursos de manufactura	44
3.3.3.1	Selección de máquinas herramientas	45
3.3.3.2	Determinación de los insertos y porta insertos	46
3.3.4	Función 4. Definir condiciones satisfactorias	49
3.3.4.1	Formulación del problema de determinación de condiciones de operación	50
3.3.4.2	Modelo matemático	51
3.3.4.3	Funciones objetivo	54
3.3.5	Función 5. Representar recursos de manufactura	55
<b>Capítulo 4</b>	<b>Sistema CAE basado en modelos de información</b>	<b>57</b>
4.1	Arquitectura del sistema CAE	58
4.2	El modelo del producto	60
4.3	El modelo de manufactura	64
4.4	El modelo de catálogos	67
4.4.1	El catálogo de herramientas de corte	67
4.4.2	El catálogo de insertos.	68
4.4.3	El catálogo de porta insertos	69
4.4.4	El catálogo de máquinas	70
4.4.5	El catálogo de elementos de sujeción	71
4.4.6	Estructura del modelo de catálogos	71
4.5	Relaciones entre modelos	72
4.6	La aplicación computacional	74

---

<b>Capítulo 5 Diseño de las bases de datos</b>	<b>78</b>
5.1 Estructura del modelo del producto	79
5.2 Estructura del modelo de manufactura	81
5.3 Estructura del modelo de catálogos	82
<b>Capítulo 6 Aplicación del sistema CAE</b>	<b>83</b>
6.1 Descripción del producto	84
6.2 Descripción del software	85
6.3 Introducción de información en el modelo del producto	85
6.4 Introducción de información en el modelo de manufactura.	92
6.5 Introducción de información en el modelo de catálogos.	94
6.5.1 El catalogo de insertos y porta insertos.	94
6.5.2 El catalogo de máquinas	98
6.5.3 El catálogo de mordazas	99
6.6 Definición de la información por la configuración de maquinaria.	100
<b>Conclusiones</b>	<b>101</b>
<b>Trabajo a futuro</b>	<b>103</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>104</b>
<b>Apéndice A</b>	<b>111</b>
<b>Apéndice B</b>	<b>117</b>

---

---

## Introducción

La selección de los recursos de manufactura afecta el costo, el tiempo de producción y la calidad de los productos. Los recursos de manufactura deben ser seleccionados para satisfacer las especificaciones de diseño y producción de los productos. Un caso particular para determinar recursos de manufactura es la configuración de maquinaria.

La configuración de maquinaria consiste en la selección de máquinas herramientas, de herramientas de corte y sujeción así como la determinación de las condiciones de operación para manufacturar una parte en particular. Se deben cumplir las especificaciones de diseño y se tienen que alcanzar un balance entre la producción, el costo y la calidad.

La necesidad de configurar máquinas herramientas es reconocida, pero no es llevada a cabo en su totalidad, en la práctica cada una de las actividades que la integran es realizada de manera independiente, existe la suposición de que los recursos para manufacturar una pieza existen en la fábrica y que estos son los adecuados para realizar cualquier proceso. En el dado caso que no exista un recurso, la suposición anterior provoca que la producción tenga que ser adaptada a la capacidad de los que existente dentro de las instalaciones de manufactura, y por consecuencia es posible que no satisfagan la calidad, costos o productividad requeridos.

Esta tesis propone un proceso de configuración de maquinaria herramientas con un enfoque concurrente para seleccionar recursos de manufactura (máquina herramienta, herramientas de corte y de sujeción) y condiciones de operación, enfatizando la estrecha relación que existe entre estos y representa la información de productos, de recursos de manufactura y de catálogos dentro de modelos de información.

Para auxiliar al proceso de configuración se propone un sistema CAE basado en modelos de información con tres modelos: del producto, de manufactura y de catálogos. El enfoque propuesto considera que la información capturada en los modelos, facilita la selección concurrente de recursos y condiciones de operación. La información de los modelos es usada por una aplicación de software que permite la configuración de máquinas. La aplicación emplea redes neuronales para seleccionar recursos y procesos de manufactura, así como algoritmos genéticos para determinar las condiciones de operación basadas en un compromiso entre la producción el costo y la calidad.

La tesis está constituida por seis capítulos: en el primero se presentan los antecedentes de la tesis. En el capítulo 2 se muestran los objetivos, alcances y aportaciones de la investigación. El capítulo 3 presenta la configuración de maquinaria, describiéndose las actividades del proceso de configuración. En el capítulo 4 se describe el sistema CEA propuesto, mostrándose en el capítulo 5 el diseño de los modelos de información. Por ultimo el capítulo 6 muestra la aplicación del sistema en un caso de estudio.

---

## RESUMEN

La selección de recursos de manufactura afecta al costo, tiempo y calidad de los productos. Los recursos de manufactura deben ser seleccionados para cumplir con las especificaciones de diseño, con los requerimientos de producción y con un balance entre el volumen de producción, costo y la calidad que se requiere alcanzar, para esto se necesita un intenso intercambio de información. La presente investigación explora el uso de modelos de información para determinar recursos de manufactura con un enfoque concurrente, considerando la estrecha relación que entre estos existe, se le ha llamado configuración de maquinaria y se constituye por la selección de la máquina herramienta, de las herramientas de corte y sujeción así como de las condiciones de operación.

Para auxiliar al proceso de configuración de maquinaria se emplea un sistema CAE basado en tres modelos de información, uno del producto en el cual se representa la información del producto, otro de manufactura con información de los procesos y recursos existentes en las instalaciones y uno más de catálogos el cual contiene datos de fabricantes de recursos de manufactura. El enfoque propuesto en esta investigación considera que la información capturada en los modelos de información facilita la selección concurrente de los recursos de manufactura y las condiciones de operación. Los tres modelos son utilizados por una aplicación de software que emplea redes neuronales para seleccionar recursos de manufactura y algoritmos genéticos para determinar condiciones de operación buscando encontrar el mejor compromiso entre el costo, el tiempo y la calidad. La utilidad del trabajo se ilustra mediante un caso de estudio.

Esta investigación integra diferentes procesos involucrados en la planeación de procesos manufactura pero está particularmente enfocado a la selección de recursos de manufactura.



---

---

## ABSTRACT

The selection of manufacturing resources affects the cost, time and quality of products. Manufacturing resources must be selected to fulfill product design specifications, production requirements and the best compromise between production rate, cost and quality. To this is necessary an intense information exchange. This research explore the use of information models to determinate manufacturing resources under a concurrent approach, emphasizing the close relationship that exists between them, this has been called machine tools configuration, as it includes the selection of the required machine, and the corresponding cutters, fixtures and operation conditions.

To aid in the above mentioned approach a CAE system based on three information models is used. The system includes: a product model to represent product information, a manufacturing model to hold information about the manufacturing process and resources of an enterprise, and a catalogue model with suppliers data. The approach proposed in this research considers that the information captured within the information models, facilitates the concurrent selection of recourses and operation conditions. The three models are used by an a software application that employs neural networks to select manufacturing processes and resources, and genetic algorithms to determine operation conditions based on a compromise between cost, time and quality uses the information models. The utility of the process and of the CAE system is illustrated with a case study.

This research integrates different processes involved in process planning, but is particularly focused on manufacturing resources selection.

# Capítulo 1 Antecedentes

En este capítulo se tratan los antecedentes de la investigación relacionada a la configuración de maquinaria, los cuales se han dividido en dos partes. La primera se refiere a los relacionados con el modelado de la información, se tratan los conceptos básicos y la descripción de arquitecturas de referencia que conducen al desarrollo del modelo MOSES empleado en esta investigación. La segunda parte cubre lo concerniente a los antecedentes bibliográficos de la configuración de maquinaria, de la selección de herramientas de corte, de máquinas herramientas, y de la determinación de las condiciones de operación, además de técnicas de inteligencia artificial tales como los sistemas expertos, redes neuronales, algoritmos genéticos y la lógica difusa. Por último se establece una serie de comentarios derivados de observaciones hechas sobre la lectura de los antecedentes.

## **1.1 Antecedentes de modelos de información**

### 1.1.1 El modelado de la información

Para sobrevivir a la competencia en el mercado global al que se enfrentan las empresas es necesario evolucionar y reaccionar a los cambios, la adaptación a ellos debe ser un estado dinámico natural más que ocasionalmente forzado. En esta competencia, uno de los problemas a enfrentar, debido a las necesidades internas de adaptación, es el manejo e integración de información.

El manejo e integración de información se ha convertido en el punto medular para el desarrollo de cualquier sistema de producción. Para usar la información es necesario representarla, capturar su significado y su estructura inherente, de tal forma que pueda ser manejada y explotada (Toh 1999).

En el diseño y manufactura la información desempeña un rol de gran importancia, y es que el desarrollo de un producto, es en términos de los requerimientos que de ésta tienen los distintos procesos, mismos que requieren que sea integrada, disponible, accesible y coherente para su comunicación.

Desde hace dos décadas y hasta la fecha se realizan grandes esfuerzos en la búsqueda, almacenamiento, transformación, representación e interpretación de la información. Uno de los resultados de este esfuerzo es el desarrollo de los sistemas CIM (*computer integrated manufacturing*).

Los CIM son una filosofía de manufactura en la cual las funciones para la realización de un producto, desde la definición hasta la disposición final del mismo, son diseñadas e integradas para alcanzar claramente las metas enunciadas por la organización, eficiente y efectivamente. Su objetivo es integrar apropiadamente las operaciones de una empresa por medio de un intercambio de información dentro y fuera de la misma con ayuda de la

tecnología informática (Ahmad 2001). El CIM involucra la integración, manejo e implementación de la información y la automatización de los sistemas en empresas, con los cuales se permita establecer el flujo de información, materiales y objetos así como la interrelación entre componentes tecnológicos. A pesar de lo anteriormente dicho, los CIM no muestran todos los detalles necesarios para una implementación global. A la par de los CIM y como parte de ellos se han desarrollado diversas arquitecturas y modelos de empresa.

### 1.1.2 Arquitecturas y modelos de empresas

En el diseño e integración de sistemas de manufactura diferentes enfoques tienen que ser considerados (humano, técnico, etc.). Para ello se han creado diferentes arquitecturas y modelos de referencia.

Una arquitectura es una abstracción de un sistema real (sistema de manufactura, sus controles, medios físicos para realizarlos, etc.), y describe la estructura conceptual y funcional (Fox 1998). Siendo la arquitectura una abstracción, requiere para su apreciación, ser visualizada por un modelo simbólico (diagramas UML, etc). De tal manera, que el modelo es el resultado concreto de la abstracción hecha por la arquitectura, a su vez es quien representa al sistema, ver figura 1.1.

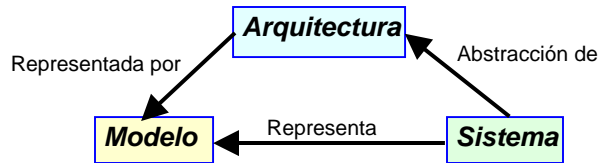


Figura 1.1. Relación arquitectura, sistema, modelo.

En la literatura es común encontrar los términos arquitecturas y modelos de referencia. Una arquitectura de referencia es genérica, de ella se hacen instancias aplicables a problemas particulares. Las arquitecturas tienen por objetivo proporcionar una estructura de información para resolver problemas de integración. La idea principal de la que parten es que gran parte de los proyectos de integración son similares y comunes en todo tipo de empresa, de modo que pueden ser estandarizados y utilizados de manera general. Una vez aceptada la estandarización puede ser auxiliada por metodologías y reglas que hagan posible su integración (Conveners, 1998). Las arquitecturas de referencia proporcionan la estructura con la cual un modelo de referencia puede ser creado.

---

Como antecedentes de la arquitectura empleada en la configuración de maquinaria, a continuación se describe la arquitectura de CIMOSA y el modelo de referencia IMPFACT, los cuales tienen influencia en el modelo de MOSES usado en esta investigación.

La arquitectura más conocida y estudiada es CIMOSA (*Manufactura Integrada por Computadora Sistema de Arquitectura Abierta*), es además la que mayor impacto ha tenido en los comités de estandarización, y ha sido la base para la definición de nuevas arquitecturas. Es por lo tanto, quizás, la más importante.

*CIMOSA (Manufactura Integrada por Computadora Sistema de Arquitectura Abierta)*

La intención de CIMOSA es la creación de una arquitectura abierta y la definición de un conjunto de conceptos y reglas para el mejoramiento y desarrollo de futuros sistemas CIM's. CIMOSA, por medio de su estructura de modelado, brindan apoyo a todas las fases del ciclo de vida de un sistema CIM desde su definición, pasando por el diseño de especificaciones, implementación hasta la ejecución (Kosanke 1995). Posee una infraestructura de integración que proporciona información específica para la ejecución de la implementación de un modelo particular, es decir, CIMOSA es una arquitectura de referencia genérica, que cubre los aspectos esenciales de una empresa, tales como el comportamiento, los recursos, la información y organización (Wortmann 2001). Para cada uno de los aspectos antes mencionados, se tiene disponible la construcción de modelos independientes unos de otros. CIMOSA considera que un modelo creado con su arquitectura debe ser ejecutable y evolucionable, es decir, que puede ser modificado durante el tiempo de ejecución.

CIMOSA posee dos partes principales (Schlots 1995):

1. Una arquitectura de referencia
2. Una arquitectura particular (ver figura 1.2).

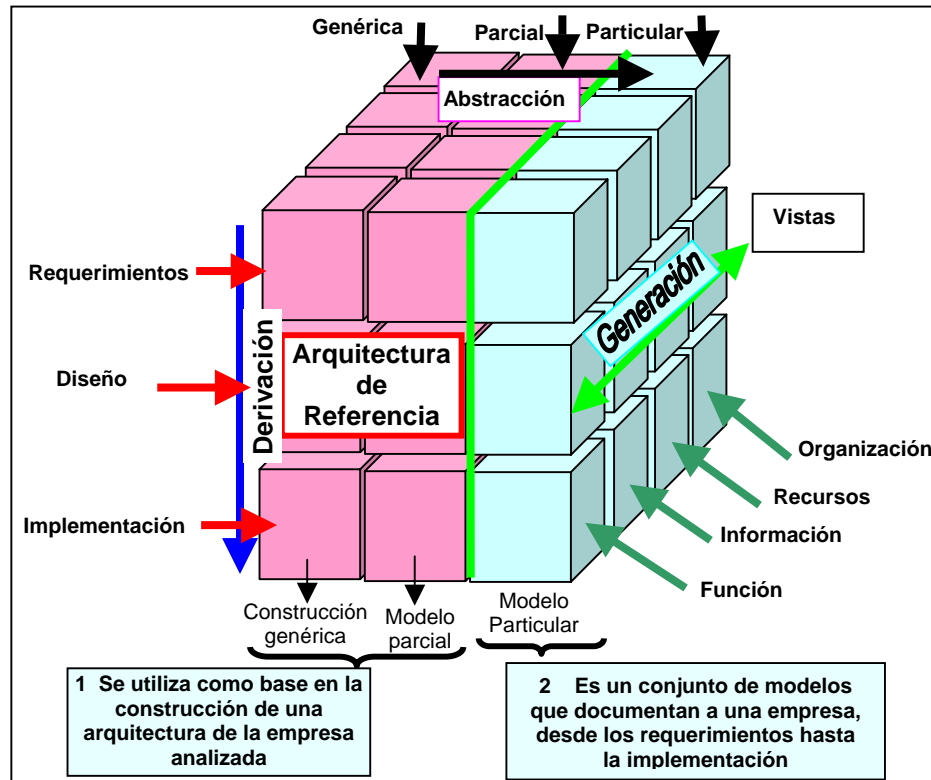


Figura 1.2 Cubo de CIMOSA adaptado de Kosanke (1995)

CIMOSA establece tres principios ortogonales: *derivación*, *abstracción* y *generación*.

El *principio de derivación* establece tres niveles de modelado sucesivos.

- *Requerimientos*. Necesidades de negocios como los percibe el usuario
- *Diseño*. Especificaciones de diseño para construir un modelo de empresa formal, conceptual y ejecutable
- *Implementación*. Documenta los detalles de la implementación, recursos instalados, mecanismos y aspectos no determinados.

El *principio de abstracción* está constituido por tres niveles de modelado.

- *Genérica*. Bloques constructivos (elementos del lenguaje de modelado)
- *Parcial*. Biblioteca de modelos parciales clasificados por sector industrial para ser usados en modelos particulares
- *Particular*. Modelos específicos de empresa.

El *principio de generación* recomienda modelar empresas industriales con cuatro vistas básicas y complementarias.

- *Organización.* Representa los niveles organizacionales, autoridades y responsabilidades
- *Recurso.* Representa los medios con que cuenta la empresa, sus capacidades y administración.
- *Información.* Representa los objetos de empresa y sus elementos de información.
- *Función.* Representa la funcionalidad y comportamientos (eventos, actividades y procesos) de la empresa incluyendo aspectos temporales y manejo de excepciones.

CIMOSA provee un enfoque basado en procesos y eventos, considera a la empresa como una federación de agentes con capacidad de comunicación, que ejecutan un conjunto de procesos concurrentes correctamente coordinados.

IMPPACT (*Modelado Integrado de Productos y Procesos usando Tecnologías Avanzadas de Computo*)

Es un modelo de referencia para el modelado de productos y proceso de partes discretas. Una parte discreta es la que posee propiedades y características específicas para una aplicación determinada. El modelo se aplica en forma general a todos los aspectos y campos sin importar el tamaño, misión, o atributos de un sistema. IMPPACT se basa en el principio generalizado de que en cualquier empresa existe un único conjunto de procesos que son ejecutados en orden para diseñar, planear y producir (IMPPACT 1993),

El objetivo de IMPPACT es desarrollar una nueva generación de sistemas de modelado que integren, el diseño de productos y la planeación del proceso de manufactura incluyendo la generación del código de control numérico de maquinaria (IMPPACT 1993).

IMPPACT emplea los mismos tres ejes de CIMOSA para desarrollar el modelo (ver figura 1.3).

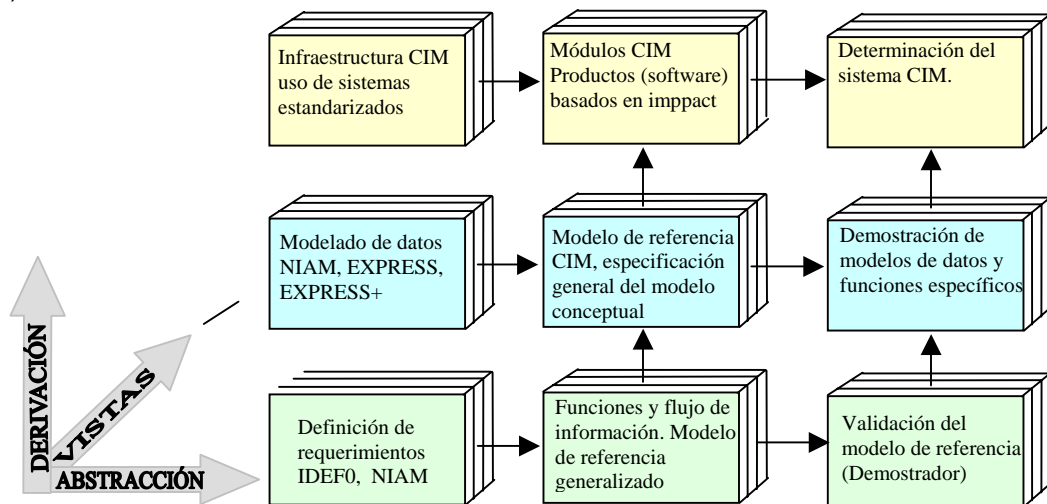


Figura 1.3 Estructura de IMPPACT. Adaptado de IMPPACT (1993)

---

La abstracción está cimentada en construcciones de modelos genéricos con los cuales se pueden derivar modelos más específicos. La derivación se basa en la idea de que la construcción de un CIM debe estar fundamentada en el análisis de los requerimientos del usuario final. Cada bloque está constituido por cuatro vistas:

- Funcional, que identifica las funciones del sistema,
- Información, que identifica la información particular necesaria para realizar las funciones,
- De recursos y de organización que representan la implementación y el personal requerido en los diferentes niveles de la empresa.

IMPPACT define tres modelos:

1. Modelo del producto; contiene toda la información referente a la parte, se enfoca principalmente al modelado geométrico, tecnológico y funcional de la parte.
2. Modelo del proceso; describe los procesos y operaciones.
3. Modelo de fábrica; se especifican los recursos reales de producción y las relaciones físicas y lógicas entre los recursos.

A continuación se describe brevemente el modelo del producto y el de fábrica.

El modelo del producto tiene como núcleo la “definición del producto”. La definición del producto se refiere a la forma, considerando que ésta puede ser o no física (por ejemplo material y línea de centro). La definición es una generalización de las características (primitivas), partes y ensambles (los ensambles están fuera del alcance de IMPPACT). Desde el punto de vista semántico no existe diferencia entre los conceptos antes mencionados: todos tienen forma, atributos y pueden ser parte de otras definiciones de productos (las partes contienen características y las características contienen sub-características, etc.). El modelo se enfoca a dos puntos de vista; 1) el de diseño, que cubre la información funcional, tal como los requerimientos y 2) el de manufactura, que sólo trata el cómo fue producido.

El modelo de fábrica de IMPPACT integra talleres, el taller está compuesto por centros de trabajo, los cuales contienen estaciones de trabajo y trabajadores. Un trabajador puede ser requerido por una estación de trabajo ó depender de un centro de trabajo ó de un taller. Una estación de trabajo tiene su propio almacén de herramientas o comparte herramientas. De modo que a los recursos de producción los agrupa en; taller, centro de trabajo, estación de trabajo, herramienta, almacén de herramientas, adaptador de herramientas, trabajador, medios de transporte, mantenimiento de transporte.



Cada recurso está relacionado uno con otro y definen a una fábrica. A cada recurso lo caracteriza por medio de atributos económicos, administrativos y operativos.

### 1.1.3 MOSES (Sistema de modelado orientado a ingeniería simultánea)

Es un modelo de referencia pensado para brindar apoyo en el desarrollo de nuevas y existentes estructuras CAE. Establece un conjunto genérico de puntos de vista, recomienda metodologías y herramientas estándares para asistir en la especificación, desarrollo y análisis de cada punto de vista (MOSES 2003).

MOSES es una implementación específica, representa un caso particular de una empresa en su ciclo de vida en un punto del tiempo.

Los objetivos del proyecto MOSES fueron:

- Proporcionar un modelo de referencia para sistemas CAE basados en modelos de producto y manufactura.
- Identificar la información y procedimientos necesarios para auxiliar un proceso de ingeniería simultánea relacionado con el diseño concurrente para funciones y el diseño para manufactura, definida y aplicada en un medio ambiente de software.

MOSES está integrado por dos modelos de información, del producto y de manufactura unidos por un moderador a varias aplicaciones, (ver figura 1.4). Se ha considerado que dos modelos de información son trascendentes para asistir las actividades de diseño y manufactura. Al almacenamiento de datos en forma estructurada en un mismo depósito de información para ser compartido por diferentes aplicaciones de software, se le conoce como modelo de información.

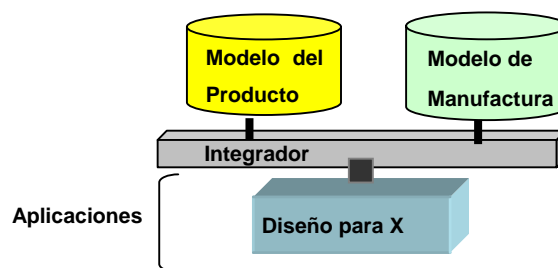


Figura 1.4 Estructura de MOSES

#### Modelo del producto

Un modelo del producto es una representación computacional de la información que describe a un producto. La representación computacional se constituye por un *modelo de*

---

*datos del producto*, el cual define la forma y contenido de la información del producto, y un *modelo del producto* el cual contiene datos específicos y particulares. El modelo de datos proporciona conceptos genéricos con los cuales se pueden derivar instancias, es decir, modelos de productos

#### Modelo de manufactura

Describe y representa en forma estructurada, a los procesos, recursos y estrategias de manufactura de una empresa en diferentes niveles de abstracción, captura la información en términos de sus instalaciones y capacidad (Molina 1995). El modelo representa en detalle la capacidad de manufactura y la situación actual de una empresa.

La estructuración de información de los recursos y procesos permite tener una representación confiable de las instalaciones de manufactura y sus capacidades en términos de procesos y equipos. Las estrategias de manufactura son las decisiones tomadas en el uso y organización de los recursos de manufactura. Aplica dos tipos de decisiones a la estrategia de manufactura: las decisiones tomadas con base en el tiempo las cuales definen la estructura, capacidad y tecnología de las instalaciones; y las decisiones que día a día determinan el cómo usar las instalaciones y procesos relacionados. En el modelo de manufactura las estrategias representan cómo los recursos y procesos están estructurados y son usados para ejecutar las funciones y alcanzar los objetivos de la empresa.

La efectividad de MOSES queda demostrada, por ejemplo, en la ingeniería inversa (Borja et al, 2001a), en diseño de moldes de inyección de plásticos (Costa 2000, Morano et al. 2003), en el diseño para manufactura (Borja et al. 2001b y Ayala et al.2003) y en el diseño para ensamble (Dorador, 2001).

### **1.2 Antecedentes de la configuración de maquinaria**

La configuración de maquinaria es un proceso mediante el cual se determinan las máquinas herramientas, los herramientas de corte y sujeción, así como las condiciones de operación adecuadas para producir una pieza cumpliendo con las especificaciones de diseño y manufactura, dadas las especificaciones de diseño de una pieza. En las siguientes secciones se presenta el estado del arte de las actividades involucradas en la configuración, Tales actividades comprenden: la selección de máquinas herramientas, de herramientas de corte y sujeción, y de las condiciones de operación.

### 1.2.1 La selección de herramientas de corte.

El proceso de manufactura involucra varias disciplinas, una de las más importantes y que afecta directamente al tiempo de producción, es la selección de la herramienta de corte.

La selección de las herramientas de corte es un punto crítico en la planeación del proceso de manufactura, tanto que a través de los años, como se muestra en los antecedentes que a continuación se presentan, se ha buscado su automatización. Trabajos representativos sobre el tema de selección de herramientas de corte se describen a continuación.

Chang y Bala (1991) desarrollan un sistema automático para seleccionar la herramienta de corte de acuerdo al tipo de trayectoria que se requiere para generar una característica geométrica. En el sistema usa reglas lógicas del tipo “*if*” “*then*”.

Dhage y Usher (1993) proponen un sistema asistido por computadora para la selección de herramientas de corte, constituido por dos bases de datos. En las bases se encuentra información de costos, tamaños, tipos de recubrimiento, tamaño de la viruta, rangos de velocidad, profundidad, etc. Por medio de reglas lógicas “*if*” “*then*” y prácticas de manufactura determinan el porta herramientas e inserto requerido.

Usher y Fernandez (1999) desarrollan una aplicación orientada a objetos para la selección de herramientas de corte, basándose en la geometría requerida y en la información técnica de la pieza (tolerancia, acabados y tratamientos superficiales, etc.). Utilizan un método analítico para determinar los parámetros de las herramientas y otro heurístico para seleccionar el tipo de herramienta y porta herramienta.

Arezo *et al* (2000) proponen un sistema experto para la selección de herramientas de corte. Contiene datos de porta herramientas, insertos, material, reglas de preferencia y comparación, constantes de material, entre otros. El sistema considera dos elementos de trabajo; las característica geométricas (primitivas) y los requerimientos técnicos de la pieza. Mediante las reglas de preferencia y comparación asigna la herramienta adecuada a la característica geométrica.

Wang *et al* (2005) proponen un método para la selección de herramientas de corte incluyendo el tipo y tamaño para cada operación en la manufactura de moldes, a través de un enfoque heurísticos basado una serie de preguntas y con algunos parámetro que evalúan características geométricas, determinan el tamaño y tipo de herramienta, construyen un modelo matemático para optimizar las herramientas encontradas. Los objetivos de la optimización son el tiempo de maquinado, la eficiencia y el acabado superficial. Presenta modelos para operaciones de corte de desbaste, medio y fino.

### 1.2.2 Condiciones de operación

La determinación de las condiciones de operación es también uno de los puntos críticos en la planeación del proceso de manufactura, la investigación en este tema es limitada y es que se trata de un problema de optimización de múltiples criterios, donde los métodos de solución son pocos, pero se aprecia un buen progreso en el desarrollo de algoritmos, principalmente los que hacen uso de la metaheurística,

Para determinar las condiciones de operación se han empleado diferentes métodos por ejemplo, Gopalakrishnan y Khayyal (1991) emplean para la optimización de las condiciones de operación, la programación geométrica de un grado de libertad aplicada a problemas duales, sus objetivos son encontrar el mínimo costo y la máxima producción.

Shin y Joo (1992) optimizan las condiciones de operación empleando programación geométrica, el objetivo es determinar las condiciones de velocidad de corte, alimentación, profundidad de corte para obtener el mínimo costo de producción.

Gupta y Batra (1995) hacen uso de las ecuaciones desarrolladas por Shin y Joo para determinar la profundidad de corte de múltiples pasos en operaciones de torneado.

Hasmi y Baradie (1998) proponen un método para determinar condiciones de operación utilizando la lógica difusa. Determinan las diferentes profundidades de corte posibles para diferentes tipos de herramientas.

Hui *et al* (2001) emplean el método de gradiente de diferencia finitas y quasi – newton. En su función objetivo introducen el concepto de costo de calidad y buscan la máxima producción.

Wang *et al* (2002) emplean un enfoque determinista para la optimización de las condiciones de operación, buscan la máxima producción.

Cus *et al* (2003) proponen un método de optimización basado en algoritmos genéticos, optimiza el mínimo tiempo y costo de producción así como la máxima calidad.

Chen, M. (2004) presenta una técnica de optimización recientemente desarrollada en el área de metaheurística, conocida como búsqueda dispersa (*scatter search*). Emplea las funciones objetivo desarrolladas por Shin y Joo.

Liang Ding *et al* (2005) presentan una estrategia de optimización para el proceso de secuencias de operación de manufactura basado en la adaptación de múltiples objetivos como son el mínimo costo de producción, el tiempo de producción más corto y la mejor secuencia de manufactura. Presentan un enfoque que incorpora, algoritmos genéticos para optimizar la secuencia de operaciones, redes neuronales para calcular costos y tiempos de producción. La secuencia de operación la obtiene de acuerdo a una estructura jerárquica, con la que evalúa la manufacturabilidad y determina el orden a seguir.

Wang y Jawahir (2005) desarrollan un método basado en algoritmos genéticos para optimizar las condiciones de operación y la selección de herramientas de corte, para operaciones de torneado en múltiples pasos. El método es una continuación del presentado

---

en Wang *et al* (2002). Una de las principales características de este trabajo, es la inclusión en la función objetivo del desgaste de la herramienta de corte. Presenta una comparación entre el proceso de optimización considerando y no, el efecto de desgaste de la herramienta de corte. En la determinación de las condiciones de operación, la configuración de maquinaria emplea tres funciones objetivas enfocadas a encontrar, el mínimo costo y tiempo de producción y la máxima calidad.

Cabe resaltar que al igual que en la selección de la herramienta de corte, las investigaciones sobre la determinación de las condiciones de operación, no se realizan simultáneamente con la selección de la máquina o la herramienta de corte.

### 1.2.2 Selección de máquinas

La selección de máquinas herramientas es una importante decisión que se tiene que tomar en el proceso de planeación de manufactura. Una impropia selección puede afectar negativamente la ejecución del sistema de producción. La velocidad, calidad y costo de manufactura dependen fuertemente de la máquina empleada. Poco se ha investigado sobre el tema. Algunos de los trabajos más representativos se mencionan a continuación.

Atmani y Lahkari (1998) desarrollan un modelo matemático basado en la programación lineal para asignar máquinas herramientas a un sistema de manufactura flexible. Consideran que existe un conjunto de máquinas conociéndose la capacidad que tienen para ejecutar ciertos procesos, además que existe un conjunto de partes con sus respectivas operaciones de manufactura, y que cada operación de un tipo de parte puede ser asignada a varias máquinas usando herramientas de corte específicas. El proceso minimiza el costo total de las operaciones de manufactura, el manejo de material y del arranque de las máquinas.

Gindi *et al* (1998) representan la capacidad de las máquinas herramientas para generar formas geométricas (primitivas). La cual es determinada mediante la combinación de la geometría de la herramienta y los movimientos que puede generar la máquina. Utiliza el método de agrupamientos (*clusters*) para generar grupos de máquinas y formas geométricas de acuerdo a su similitud. El problema se traduce en encontrar el conjunto óptimo (primitiva / máquina) con máxima similitud.

Wang *et al* (2000) enfocan su estudio para la selección de maquinaria a la asignación de pesos en los criterios de evaluación, para esto, desarrollan un modelo matemático basado en la lógica difusa.

Cagdas *et al*. (2004) desarrollan un sistema para la selección de máquinas herramientas que usa una serie de factores de peso en diferentes criterios para evaluar a las máquinas. Crean una base de datos con las máquinas existentes en el mercado, clasificadas de acuerdo a

---

especificaciones generales, proponen nueve criterios con diferentes factores de peso y un método de evaluación.

Gopalakrishnan *et al* (2004) presentan una metodología para la selección de centros de maquinado, considerando varias opciones dependiendo de los agregados a la configuración básica de la máquina. Para seleccionar una máquina, la metodología primero establece una serie de prioridades basadas en las características deseadas para satisfacer un costo, después considera el tamaño de la máquina el cual es limitado por las partes a maquinar, los elementos de sujeción, el área de maquinado, el espacio disponible y el costo. Considera también aspectos como la productividad, la velocidad, precisión, entre otros. La selección depende de los factores de peso que se dan a cada una de las categorías antes mencionadas y de las prioridad que el usuario determine, por ejemplo, la velocidad de la máquina.

### 1.2.3 Sistemas CAPP (Planeación de Procesos Asistida por Computadora)

El maquinado es un proceso de manufactura que se refiere a la remoción de material por medio de movimientos que pueden ser rotativos, rectilíneos o un combinación de ambos, entre la pieza de trabajo y la herramienta de corte. La función principal es cambiar la forma del material para obtener el componente final deseado (Sandvik 1996).

Debido al desarrollo tecnológico de las máquinas de control numérico, las condiciones de maquinado gobernadas por parámetros como la alimentación, velocidad y profundidad de corte pueden ser controladas con gran precisión, y con ello la productividad y calidad pueden ser mejoradas a bajos costos de operación, el éxito o fracaso para alcanzar estas metas depende de cómo sea planeado el proceso de manufactura (Igwata 1996).

La planificación del proceso es una acción que prepara las instrucciones detalladas de las operaciones que convierten el diseño de ingeniería en una pieza final. Provee información importantes sobre la fabricación, tal como la identificación de máquinas, de herramientas, la selección de condiciones de operación, y los requerimientos del diseño (Alting 1998).

La planeación de procesos ha sido reconocida como una de las tareas más importantes en la investigación de la ingeniería de manufactura. Constituye el principal eslabón entre el CAD (Ingeniería Asistida por Computadora) y el CAM (Shaw *et al* 2000) El desarrollo de los CAPPs ha logrado la automatización y estandarización de algunas funciones de la planeación. Sin embargo, la generalización de los CAPP no ha alcanzado niveles satisfactorios para los estándares industriales teniendo una aplicación limitadas (Rosado *et al* 2004). Una observación que se hace, es que carecen de una estructura que contemple tanto la geometría, dimensiones, tolerancias, materiales y requerimientos de producción

---

(número de piezas requeridas, tiempo y costo) de un producto, como la información de las instalaciones de manufactura que incluya su capacidad actual y la forma en que son empleadas para producir. A pesar de todo, el estudio de los sistemas CAPP es uno de los principales temas de investigación en el campo de la manufactura.

Entre los trabajos relacionados con estos sistemas, se encuentran los realizados por Ham (1985), Shah (1991), Devereddy (1999), Chang (2000), Lioneli (2003), y Alma (2003). Estos trabajos en forma general, describen sistemas para desarrollar un plan del procesos. Principalmente se enfocan a la identificación de características geométricas y sus atributos, o a la asignación de operaciones de manufactura.

S. M. Amaitik y S. E. Kilic (2005) desarrollan un modelador de partes prismáticas en 3 dimensiones, basado en características (primitivas) y el estándar STEP para aplicarlo a un sistema CAPP. Utilizan el enfoque orientado a objetos para definir e implementar la información de un modelo del producto. Puntualizan las ventajas que éste tiene comparado con el modelado geométrico, hacen referencia a la capacidad del modelador de asociar la información de la geometría y la topología, además de tolerancias, propiedades del materia, características y otro tipo de información. El modelado consiste de tres etapas: (1) elección de una forma básica para desarrollar una parte, (2) selección de características que son agregadas o restadas a la forma seleccionada, y (3) proporcionar la información necesaria para definir el tamaño, posición, orientación y otros atributos como el acabado superficial, las tolerancias, etc. La parte diseñada es desarrollada en un formato STEP XML.

González y Rasado (2005) proponen un modelo del producto para aplicarlo a un sistema CAPP basado en primitivas que representan partes maquinadas. Consideran que uno de los principales problemas para la integración del CAD y el CAPP es precisamente el modelo del producto empleado, el cual debe ser general, pero al mismo tiempo adecuados para un sistema CAPP, es decir, un modelo que represente al producto conceptualmente y que facilite el desarrollo de las funciones del proceso de planeación, que opera con conceptos de manufacturara. El modelo que proponen pretende representar, toda la información necesaria para la manufactura de una parte, integrándola a las primitivas. Una de las principales características del modelo es la ausencia de entidades geométricas convencionales, esto es, un modelo del producto sin entidades geométricas, que permite la generación de funciones del proceso de planeación de la manufactura, independiente de la geometría del producto. El dominio de aplicación es la asignación de procesos y máquinas en el maquinado de partes

### 1.3 Antecedentes de inteligencia artificial y sus técnicas

En esta sección se define el concepto de inteligencia artificial (IA) así como las herramientas más empleadas y su aplicación en el diseño y manufactura.

La inteligencia artificial (IA) es parte de la ciencia computacional, relacionada con los sistemas que emplean características asociadas con el comportamiento humano, como el razonamiento, la resolución de problemas, entre otros. El objetivo principal de la IA es imitar el comportamiento humano en una computadora para la resolver problemas, sus características principales son la aplicación y uso del conocimiento (Kristen 2003).

En los últimos años los sistemas de manufactura han sufrido dramáticos cambios, esto como resultado del uso de avanzadas tecnologías empleadas en las fábricas. Actualmente, las empresas están luchando por atender y mantener un estatus de clase mundial a través de la automatización, y del empleo de programas de computo sofisticados. El desarrollo de los sistemas computacionales para asistir la manufactura, se perfila hacia una fase de transición hacia los sistemas de manufactura inteligente, los cuales tienen la característica de resolver problemas sin poseer un algoritmo detallado o explícito, para cada proceso de solución o para todos los casos, cuentan con relaciones matemáticas y modelos arreglados de tal forma que permiten determinar una solución. En los sistemas de manufactura se requiere manipular una enorme cantidad de información, las técnicas de IA están diseñadas para capturar, representar, organizar y utilizar a toda la información disponible dentro de una computadora, de aquí la importancia que tiene la incorporación de herramientas de inteligencia artificial como los sistemas expertos, redes neuronales, algoritmos genéticos y lógica difusa en los sistemas de manufactura. En las siguientes secciones se describen los sistemas expertos, redes neuronales, la lógica difusa y algoritmos genéticos.

#### 1.3.1 Sistema Experto

Un sistema experto (SE) es un programa de computadora que utiliza conocimiento y técnicas de razonamiento, para resolver un problema dentro de un cierto dominio. Pretende emular el comportamiento de un experto humano al tomar una decisión, modelando el proceso mental que éste realiza (Durkin, 1994). Son particularmente aplicados a problemas enfocados a un campo del conocimiento, por lo general ejecutan tareas bien definidas siendo capaces de explicar sus acciones, justificar sus conclusiones y proporcionar a los usuarios la información que contienen. Un SE básico se constituye por una interfase, un motor de inferencia, un



mecanismo de adquisición de conocimiento y una base de conocimiento, su estructura se muestra en la figura 1.5 (Huang 1995).

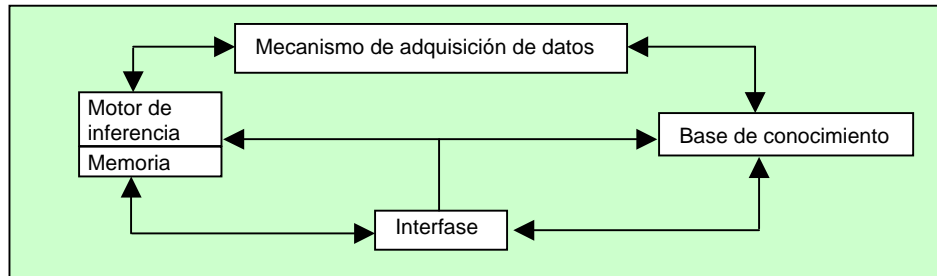


Figura 1.5. Estructura básica de un sistema experto.

La interfase proporciona la comunicación necesaria entre el usuario y el motor de inferencia, mediante ella se da la descripción de un problema para el cual se busca su solución, además del mantenimiento del sistema experto y la introducción del conocimiento en la base de datos.

El motor de inferencia es un mecanismo de razonamiento lógico, que procesa el conocimiento con la descripción del problema dado y trata de encontrar una solución.

La base de conocimiento es un archivo que contiene los hechos y la heurística que emplearía un experto humano para resolver un problema. En el sistema experto, el conocimiento sobre un problema está explícitamente representado en ésta base, el cual se expresa por medio de un código computacional, comúnmente en reglas de la forma “if-then” o en una estructura con una serie de preguntas. Los problemas se resuelven usando esas reglas por medio del motor de inferencia, el conocimiento empleado en la resolución es llamado dominio.

El mecanismo de adquisición procesa los datos introducidos por un experto y los transforma en una representación entendible por el sistema.

El sistema experto representa la transición del procesamiento tradicional de datos al de conocimiento, ofrece un medio para incorporar las capacidades humanas y el poder de las computadoras. Algunas de las ventajas y desventajas de los sistemas expertos se indican a continuación.

#### Ventajas de los sistemas expertos

- Se puede incorporar conocimiento cuando es definido.
- Es capaz de explicar su actuación.
- Puede aplicar la heurística para simplificar una búsqueda compleja.

---

#### Desventajas de un sistema experto

- El mantenimiento es complejo y difícil.
- Se requiere de un experto par construir o modificar el sistema.
- El experto debe ser capaz de articular las reglas que definen una solución sin caer en incoherencias
- El proceso de desarrollo es lento y dependiente del dominio del problema.
- El tiempo de ejecución puede ser un problema.

#### 1.3.2 Redes neuronales artificiales (RNA)

Las redes neuronales artificiales son la segunda generación de técnicas de inteligencia artificial. Representan un intento para entender el funcionamiento del cerebro humano, imitando su proceso para resolver un problema. Una RNA es un sistema compuesto por varios elementos de procesamiento conectados en paralelo, cuyas funciones están determinadas principalmente por un patrón de conectividad (Joo. 2000).

Una red neuronal está constituida por elementos de procesamiento (EP) no lineales operando en paralelo e independientes unos de los otros, y pesos ( $w$ ) como conexiones (Freeman 1991), (ver figura 1.6). Un conjunto de elementos de procesamiento forma una capa de la red neuronal, cada elemento recolecta los valores de todas las conexiones de entrada (vector de entrada) y ejecuta una operación matemática predefinida, por lo general la suma, seguido por una función de activación del elemento de procesamiento, y produce un simple valor de salida que es propagado a las otras capas (escondida, y de salida). Los pesos son valores determinados por un proceso de aprendizaje, aunque algunas veces pueden ser predeterminados. Es por medio del ajuste de sus pesos que una red puede aprender, y por medio de la actualización de las operaciones de los elemento de procesamiento, que la red neuronal es capaz de recolectar información (Simon 1994). Una estructura típica de red neuronal se muestra en la figura 1.6.

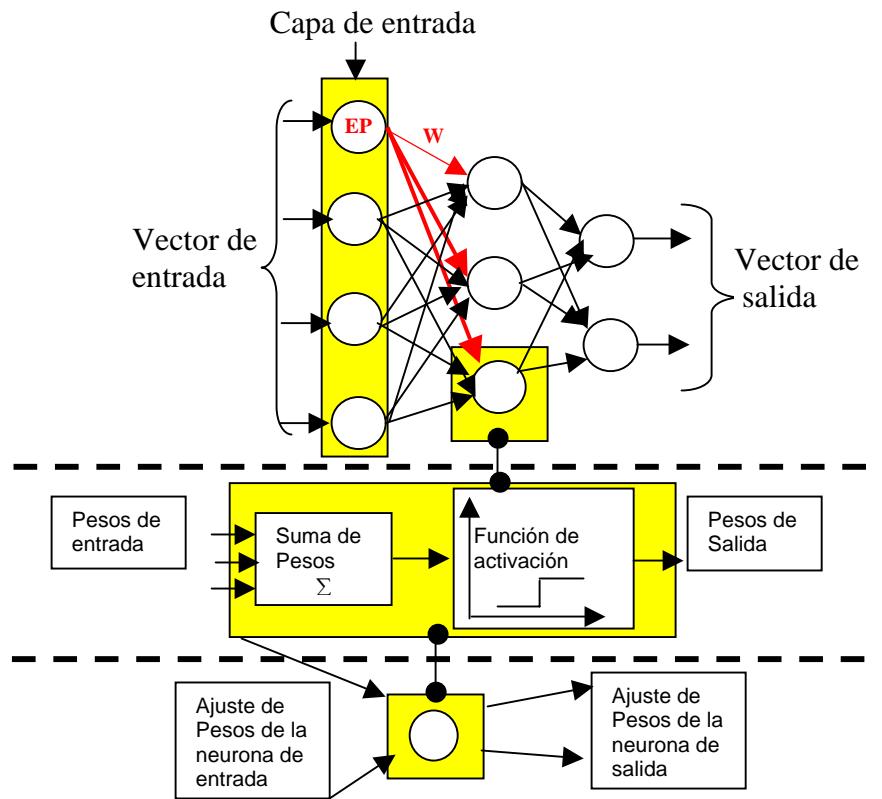


Figura 1.6. Estructura básica de una red neuronal.

En la figura 1.6 los componentes básicos son las neuronas o elementos de procesamiento. Se caracterizan por tener un límite interno y por el tipo de función de activación, las funciones más comunes son las conocidas como *hard limit*, *threshold-logic*, *sigmoidal*, siendo esta última la más empleada (Bishop 1995). Los EP se agrupan en capas, la que recibe los datos iniciales se le denomina de entrada. Cada EP suma todas las entradas transfiriendo los datos por medio de una función de transferencia a todos los elementos de la próxima capa. La salida de cada EP en la última capa es comparada con la salida deseada (vector de salida), la diferencia es retroalimentada a la red para que los pesos de las conexiones se ajusten y minimicen el error. A este proceso se le conoce como entrenamiento de la red, durante el cual la red es forzada a tomar los valores de una salida particular por medio de los pesos seleccionados para un patón de entrada dado. Un aspecto importante en el éxito de una red, es saber cuando detener el entrenamiento. La selección de los patrones de aprendizaje es muy importante, sino hay suficientes patrones, la red puede realizar su rutina de aprendizaje y dar resultados equivocados, o si la cantidad de patrones es muy grande la red puede sobre entrenarse y no converger en una solución.

---

La mayoría de las RNA pueden ser entrenadas adaptativamente por medio del empleo de algoritmos, los de Hopfield y Hamming son muy usados. Las redes adaptativas pueden ser entrenadas usando dos tipos de procedimiento, el entrenamiento supervisado y el no supervisado. El entrenamiento supervisado consiste en proporcionar a la red un conjunto de patrones de entrada con su respectivo patrón de salida. La red estará entrenada si produce la salida deseada. El aprendizaje no supervisado está basado en agrupamientos que, pueden clasificar un conjunto de patrones de entrenamiento en un número especificado de categorías.

Las RNA presentan las siguientes ventajas y desventajas.

Ventajas de la redes neuronales.

- Tienen la capacidad de generalizar; de un calculo anterior, pueden dar una solución a un problema nuevo.
- No necesitan expertos para representar el conocimiento.
- Tiene una estructura simple, sólo requieren de los patrones de entrada y salida para una simulación.
- El masivo número de elementos de procesamiento (neuronas) hace un cálculo más rápido que el convencional.

Desventajas de las redes neuronales

- La configuración de una RN consume tiempo, en su desarrollo se tiene la necesidad de emplear el método de prueba y error para encontrar la arquitectura apropiada para un problema dado.
- La representación del conocimiento en una red es impreciso y no fácilmente entendido.
- No pueden explicar sus resultados explícitamente.
- Hasta el momento se trabaja en desarrollar algoritmos de aprendizaje completamente eficientes, por lo tanto la convergencia de una red no está totalmente garantizada.
- No se conoce método para derivar el entrenamiento óptimo de la red.

### 1.3.3 Lógica difusa (FL)

La lógica difusa es otra de las herramientas de la inteligencia artificial. Se basa en la observación de cómo las personas toman sus decisiones considerando la imprecisión en la información, representándolos mediante modelos matemáticos (Tarricabras 1995). Tales modelos tienen la capacidad de reconocer, representar, manipular, interpretar y utilizar datos e información vaga que carece de certeza. La lógica difusa utiliza algunas estructuras lingüísticas como son: pocos, casi todos, mas o menos, muy importante, bueno apropiado, etc (Kalpakjians, S. 1997). Es una extensión de la lógica convencional, por lo tanto, lo que se representada por ella puede ser representado por la difusa, en algunos casos, la combinación de ambas es la clave del éxito (Von Altroct, C 1991).

El principio básico de la lógica difusa es simple. Una regla exacta o ley no puede ser definida para cada posible problema. Para esos casos se hacen aproximaciones a la solución del problema. Estas aproximaciones son posibles debido a la flexibilidad en la definición de las palabras que constituyen la regla o ley. La FL simula la lógica usada por los humanos por medio de modelos matemáticos. La naturaleza de esta simulación es diferente en las redes neuronales, las cuales simulan el sistema nervioso y la capacidad de aprendizaje, en cuanto la FL considera el proceso en la toma de decisiones de los humanos basados en términos lingüísticos.

Su principal uso se tiene en el manejo de conceptos vagos e información inexacta, y para el razonamiento aproximado en los sistemas expertos. Con esta lógica un sistema puede ser descrito por una simple regla que contenga varias reglas "if then". Por lo tanto, se tiene una representación del conocimiento explícita, de fácil verificación. Por otro lado, no tiene capacidad de entrenamiento. Cualquier cosa debe ser definida explícitamente en el sistema. El entrenamiento es la función más importante en una red neuronal artificial. Si esta función se combina con representación explícita de la lógica difusa, se obtiene una poderosa herramienta que se conoce como *Neuro Fuzzy Systems*.

### 1.3.4 Algoritmos genéticos (GA)

Los algoritmos genéticos son un mecanismo de búsqueda que aplica los métodos de la evolución biológica: selección basada en la población, reproducción sexual y mutación (Goldberg 1984).

Los algoritmos genéticos trabajan en forma iterativa con un número de soluciones (llamadas población), la figura 1.7 muestra un diagrama de flujo. En ausencia de cualquier conocimiento previo sobre el dominio del problema, el algoritmo genético inicia su búsqueda

---

en la población de soluciones, las evalúa y si los criterios de terminación no se satisfacen, se aplican operadores genéticos de reproducción, cruza y mutación. Los pasos que siguen son los siguientes ver figura 1.7.

- Representación

Para resolver un problema mediante algoritmos genéticos se requiere de la representación estructurada de un conjunto de parámetros. El conjunto de parámetros es codificado dentro de una cadena de longitud finita y se refiere a una posible solución, al conjunto de soluciones se le denomina población. Además es necesario definir los objetivos del problema y a las variables que son elementos de decisión. Algunos problemas requieren de restricciones, las cuales son limitaciones asociadas a las variables.

- Generación de una población.

Se genera una población inicial (a cada elemento de la población también se le conoce como individuo, en esta sección se utilizará este término) dentro de un espacio de búsqueda predefinido en el punto anterior. La población puede o no ser generada en forma aleatoria.

- Evaluación

En los algoritmos genéticos se requiere establecer algún criterio que permita diferenciar, dentro de la población, que individuos son mejores con respecto al resto y cuales no. Para esto se establece, para cada individuo, una medida de desempeño relativa a la población a la cual pertenece, es decir, de alguna forma se califican.

Cada individuo es evaluado de acuerdo a una función de adaptación (definida en el primer punto) y se le asigna un valor, si el desempeño de algunos individuos o de la población en general es satisfactorio, el proceso se detiene.

- Reproducción o Selección

La selección es generalmente el primer operador genético aplicado a la población. Una vez calificados los individuos, el algoritmo seleccionará de acuerdo a criterios preestablecidos que pueden ser por su alta calificación, en forma aleatoria, etc., a los mejor calificados, los cuales tendrán mayor oportunidad de reproducción y de esta forma incrementar la probabilidad de tener individuos con alta adaptación en el futuro.

- Variación.

En la selección se destaca a los buenos individuos de una población, pero no se genera ningún otro. El propósito de los operadores de variación es crear nuevos individuos, para ello existen dos operadores principales: la cruza y mutación.

- Cruza

Se eligen dos individuos seleccionados, estos pueden pasar a formar parte de la siguiente generación o realizar un intercambio de información mezclando sus códigos genéticos para generar hijos que posean un código híbrido. Es decir los códigos genéticos (conjunto de

parámetros) se cruzan, se fragmentan y recombinan para formar nuevos individuos esperando que estos hereden las características de sus progenitores.

En cada cruce no es del todo probable que se encuentre un individuo descendiente mejor que los padres, pero como los padres seleccionados han sobrevivido a un proceso de selección, se tiene la oportunidad de obtener buenos descendientes.

- Mutación

El objetivo de la mutación es generar nuevas soluciones que exploren otras regiones del espacio de búsqueda, que probablemente no se han sido observadas. La mutación selecciona en forma aleatoria individuos, de acuerdo a una probabilidad y los modifica, pero como en la naturaleza, puede producir escasos resultados, por esta razón la probabilidad de mutación debe ser relativamente baja.

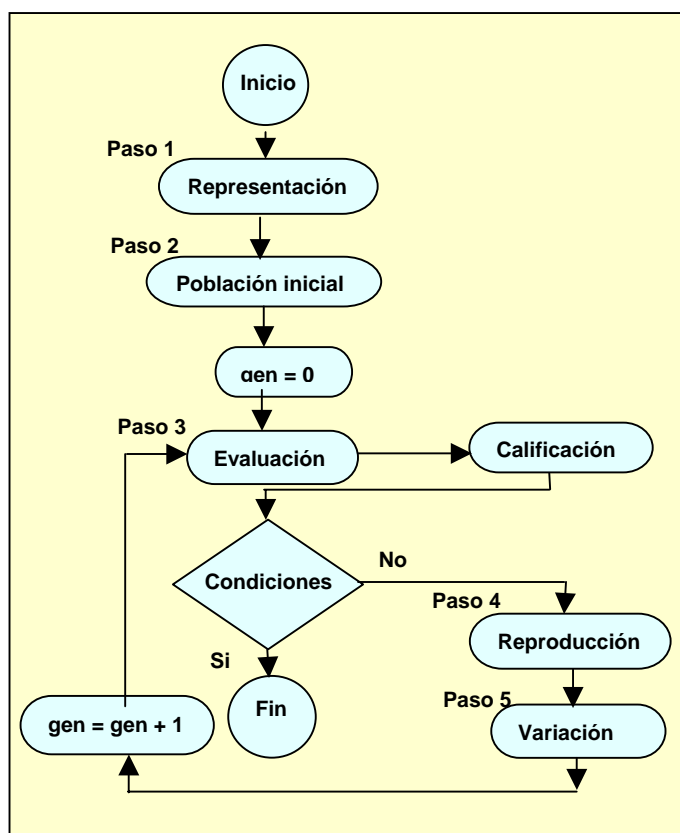


Figura 1.7 Diagrama de flujo de un algoritmo genético, adaptado de Deb (2005)

Después de la reproducción, se genera una nueva población, la cual puede tener nuevos individuos o una combinación de estos con individuos de generaciones anteriores. El proceso termina hasta que se cumplan las condiciones de paro que pueden ser el número de generaciones, un tiempo establecido, algún límite, etc.

### 1.3.4.1 La optimización de múltiples objetivos.

Cuando un problema de optimización involucra a solo una función objetivo, el problema es llamado optimización de simple objetivo. En muchos problemas de optimización se tienen involucradas a más de una función, a este tipo de problemas se le conoce como optimización de múltiples objetivos y es la que se empleará en la configuración de maquinaria. Se expresa como.

$$\begin{array}{ll}
 \text{Optimizar} & f(x), \\
 \text{sujeto a} & g(x) \leq 0 \\
 & h(x) = 0 \\
 \text{donde} & x^{\min} \leq x \leq x^{\max}
 \end{array}$$

Aquí  $f(x)$  es la función objetivo (de  $n$  variables). Las restricciones de desigualdad  $g(x)$  y las de igualdad  $h(x)$  demandan una solución  $x$ , la cual será confiable sólo si todas las restricciones son satisfechas. Muchos problemas requieren que la búsqueda sea restringida dentro de un espacio predefinido por las fronteras mínima y máxima de cada variable. Esta región es llamada espacio de búsqueda y al conjunto de todas las soluciones confiable se le denomina espacio confiable. Por lo general, existe al menos una solución  $x^*$  en el espacio confiable a la cual corresponde el valor objetivo mínimo o máximo, a tal solución se le llama solución óptima (Deb 2005). En la optimización de múltiples objetivos, el concepto de óptimo involucra a un conjunto de soluciones.

Un proceso de optimización inicia con una o más soluciones tomadas en forma aleatoria del espacio de búsqueda, utilizando la función objetivo y las restricciones se dirige hacia una región confiable para finalmente alcanzar la solución óptima explorando las posibles soluciones. El algoritmo genético empleado en la configuración de maquinaria de describe en el apéndice B.

## 1.4 Integración de los elementos en la configuración de maquinaria

La configuración de maquinaria considera que tanto las especificaciones de diseño, así como los recursos involucrados en un proceso de manufactura están relacionados entre sí, trabajan juntos y comparten información, por lo tanto deben ser considerados como un conjunto y seleccionarse en tal forma. En este sentido, la configuración de maquinaria cubre información aplicada de varias áreas que individualmente necesitan satisfacer sus propios requerimientos funcionales, y colectivamente, deben trabajar juntos constituyendo un entorno integrado, así, la integración de información es un aspecto crítico en la configuración



---

de maquinaria, constituye un entorno para su desarrollo por medio de compartir la información

La integración en el contexto de este trabajo, implica que una empresa trabaje como un conjunto de procesos en cooperación. La integración identifica la necesidad de transformar y usar información, sienta las bases para proporcionar información relevante sobre productos, recursos y proceso de manufactura así como las decisiones planeadas en el lugar y tiempo de proceso.

La integración de todas las actividades tiene relevante importancia para la configuración de maquinaria, con ella se busca asegurar la compatibilidad de los recursos, es decir, que todos puedan trabajar adecuadamente garantizando la máxima calidad del producto al costo mas bajo. Para esto considera el modelado de la información como una herramienta que haga posible este principio. Los modelos de información consideran un elemento perdido en los sistemas CIM que es, el conocimiento contextual que transformaría los datos de los recursos en agentes de integración. Este alineación de datos con conocimiento es crucial en un modelo de referencia, los cuales son una forma de integrar sistemas de información.

Un aspecto fundamental en la integración es el manejo de la información, para ello, la configuración de maquinaria empleará técnicas de inteligencia artificial y se describen en la sección 1.3.

### **1.5 Comentarios**

Con base en lo establecido en los antecedentes y a las referencias bibliográficas, se presentan los siguientes comentarios.

El trabajo más cercano a la idea de la configuración de maquinaria es la desarrollada por Dereli (2005), quien también propone una selección simultánea de los recursos de manufactura que integran una máquina herramienta (fresadora). Los recursos de manufactura propuestos mediante el método de Dereli están dentro de las instalaciones de manufactura, es decir existe el recurso, y los datos tienen que ser alimentados al sistema. El problema se presenta cuando alguno de esos recursos no es parte de las instalaciones, el método propone la compra necesaria y se suspende el proceso, en cambio la configuración de maquinaria cuanta con además de la instalaciones, con los catálogos para elegir un recurso de manufactura, creándose una fuente ilimitada de éstos para ofrecer una solución.

Relacionado con las herramientas de corte se observa una variedad de enfoques con diferentes métodos de solución, abocándose cuando mucho a la selección de herramientas de corte y de las condiciones de operación. Ninguno de los reportes encontrados considera

---

un enfoque simultáneo, en el cual se amalgame la selección de herramientas de corte con la de máquinas, con las condiciones de operación, las especificaciones de diseño y manufactura.

En la determinación de las condiciones de operación, la configuración de maquinaria propuesta por el autor emplea tres funciones objetivo enfocadas a encontrar el mínimo costo y tiempo de producción y la máxima calidad. Busca un balance entre la producción, el costo y la calidad, concepto que no había sido tratado, existen estudios con tres funciones objetivo pero sin considerar el concepto de balance que pretende la configuración de maquinaria. Cabe resaltar que al igual que en la selección de la herramienta de corte, las investigaciones sobre la determinación de las condiciones de operación, no se realizan simultáneamente con la selección de la máquina o la herramienta de corte.

Sobre la selección de máquinas herramientas prácticamente no hay literatura. Durante mucho tiempo se ha trabajado con el supuesto de que ya existen en las instalaciones de manufactura. Sus características técnicas son las restricciones empleadas en la selección de las condiciones de operación y de las herramientas de corte, y a su vez del volumen de producción, sin considerar que en algunos casos esto puede resultar contra productivo. La selección de maquinaria es un proceso que requiere de tiempo y conocimiento, la falta de formatos estándares en los catálogos de máquinas y el gran número de factores a considerar, así como la avanzada tecnología son aspectos que afectan su selección.

Los sistemas CAPP reportados en la literatura presentan el problema de integración de información. En parte por esto, la configuración de maquinaria pretende emplear modelos de información, que además han demostrado su efectividad en varias áreas de la ingeniería mecánica, por ejemplo, en la ingeniería inversa (Borja et al, 2001a), en diseño de moldes de inyección de plásticos (Costa 2000, Morano *et al.* 2003), en el diseño para manufactura (Borja *et al.* 2001b y Ayala *et al.* 2003) y en el diseño para ensamble (Dorador, 2001).

Referente a la inteligencia artificial y su tendencia en los sistemas de manufactura. Actualmente, los sistemas de manufactura tienen aplicaciones de la inteligencia artificial. Los sistemas expertos se están desarrollando y aplicando en varias actividades de la manufactura. Son ampliamente usados en el diseño, planeación del proceso, programación, manejo de materiales, control de la calidad, diagnóstico de maquinaria, entre otras operaciones.

Las redes neuronales artificiales se aplican en el control de calidad, reconocimiento de patrones, ubicación de recursos, optimización, programación, mantenimiento y reparación, control y planeación de procesos, manejo de bases de datos, simulación y control de robots. La lógica difusa ha sido preferida para problemas en los cuales hay conflictos con los parámetros de un proceso. Su aplicación se ha visto limitada a la industria de la electrónica principalmente en aparatos electrodomésticos, por ejemplo en el ajuste de mecanismos de autoenfoco en las cámaras fotográficas, en las máquinas lavadoras se emplea para determinar el ciclo de lavado adecuado. En la manufactura se ha aplicado al desarrollo de la planeación del proceso de manufactura .

Los conceptos de inteligencia artificial y sus técnicas se han aplicado productivamente en diversos aspectos de toma de decisiones en la manufactura, desde el producto, desarrollo de procesos, manejo de la productividad, diagnóstico de procesos, control de calidad etc.

Existe un consenso general en que la aplicación de la IA jugará un papel clave en la manufactura del futuro.

Un obstáculo al que se enfrenta la aplicación de las diversas técnicas de la inteligencia artificial en la manufactura, es la falta de entendimiento de los problemas y enfoques de solución. Desde el punto de vista de inteligencia artificial, la manufactura es un área rica para su aplicación e investigación, pero si no se tiene un entendimiento de los problemas que actualmente enfrenta la manufactura, la aplicación de estas técnicas pueden resultar en soluciones que son sólo prácticas marginales. Para la manufactura la inteligencia artificial es una importante herramienta, pero si se tiene un limitado entendimiento de lo que en realidad significa y su relevancia en los problemas de manufactura, la aplicación de inteligencia artificial será también marginal.

## **Capítulo 2**

### **Objetivos y fundamentos de la tesis**

En este capítulo se define la intención y objetivos del trabajo reportado en la tesis, señalando los procedimientos de investigación empleados. Se establecen las aportaciones de la investigación reportándose en el desarrollo de los capítulos.

### **2.1 Intención de la investigación**

La intención de esta investigación es proponer un proceso para configurar máquinas herramientas asistido por un sistema CAE y sus componentes, el cual proporcione información que pueda ser usada en la planeación de procesos de manufactura para reducir los tiempos de planeación y producción.

### **2.2 Objetivos**

Se han determinado cuatro objetivos principales que son los siguientes:

1. Proponer un modelo de proceso para la configuración de maquinaria, que considere el manejo de datos desde un punto de vista concurrente.
2. Especificar un sistema CAE basado en los conceptos de modelos de información el cual brinde soporte al proceso de configuración de maquinaria.
3. Proponer una aplicación computacional que permita la implementación del proceso y el sistema CAE propuestos.
4. Explorar el uso del proceso de configuración de maquinaria en la industria basándose en un caso de estudio.

### **2.3 Aportaciones**

Las aportaciones de esta tesis son las siguientes:

*La definición de un proceso para la configuración de máquinas herramientas basado en principios de ingeniería concurrente.*

Del análisis de los antecedentes expuestos en el capítulo 1, el problema de configurar máquinas herramientas es reconocido y considerado como un aspecto necesario en la planeación del proceso de manufactura, sin embargo no ha sido resuelto. Se ha observado

(sección 1.2) que las especificaciones de diseño, los recursos de manufactura y las condiciones de operación son tratadas en forma aislada. Esta tesis aborda el problema en forma integral, como se describe en la sección 3.1.

*La propuesta de un modelo de información que permita captar los datos de catálogos de recursos de manufactura.*

En los antecedentes no se encontró evidencia alguna de un modelo de información similar, ni de la idea de considerar catálogos para determinar recursos en la planeación de un proceso de manufactura. Este modelo tiene importancia pues al ligarlo al modelo de manufactura, se amplía el conjunto de recursos con los cuales se puede, no solo configurar una máquina herramienta, sino también planear mejor la producción.

*La aplicación de la red neuronal tipo backpropagation para la selección de recursos de manufactura.*

No se encontró antecedente en la selección de recursos de manufactura del uso de redes neuronales. Lo importante de esta aportación es haber constituido la información de los catálogos y reglas de manufactura en los patrones de la red neuronal.

*La introducción de un mecanismo de control basado en una relación de Producción-costo-calidad.*

Aunque estos tres elementos son usados en otras investigaciones para realizar una evaluación económica de la manufactura, no tienen un enfoque de control, que permita seleccionar y operar los recursos de manufactura cumpliendo con las especificaciones del producto y con un balance entre el tiempo de producción, el costo de producción y la calidad deseada.

La propuesta de una aplicación de software, la cual es original al configurar una máquina herramienta mediante el uso de modelos de información y de técnicas de inteligencia artificial.

## **2.4 Alcances del proyecto**

Los alcances de este proyecto doctoral son:

- Establecer el estado del arte relacionado a la configuración de maquinaria y temas relacionados (capítulo 1).

- Establecer los requerimientos que se deben satisfacer para configurar una máquina herramienta (sección 3.1).
- Desarrollar el proceso de configuración de maquinaria mediante diagramas IDEF0 (apéndice A).
- La propuesta de un sistema CAE basado en modelos de información.
- Identificar la información que debe ser almacenada en los modelos de producto, de manufactura y de catálogos utilizados en la configuración de maquinaria (sección 3.2).
- Definir y desarrollar los modelos de información (capítulo 5).
- Establecer los algoritmos que seleccionen a los recursos de manufactura concurrentemente y determinen condiciones de operación (capítulo 4).
- Probar el proceso y el sistema CAE con un caso práctico (capítulo 6).

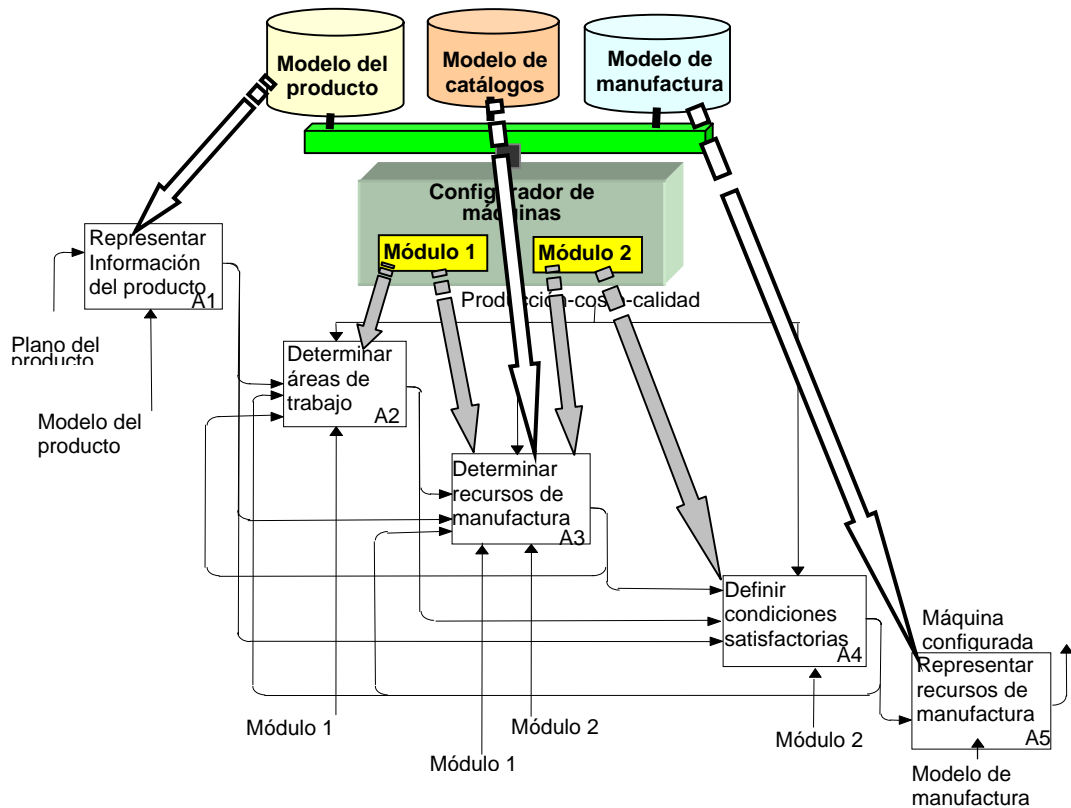
## **2.5 Metodología**

En esta sección, se presenta la metodología utilizada para esta investigación.

- Se realizó una exploración de los diferentes enfoques de configuración de maquinaria, el resultado condujo a proponer un enfoque alternativo (sección 3.1).
- Para fundamentar el proceso de configuración de maquinaria se efectuó una revisión bibliográfica relacionada al tema (capítulo 1).
- Mediante el uso de la metodología IDEF0 se modeló el proceso de configuración de maquinaria (Apéndice A).
- Analizado el proceso de configuración de máquinas, se decide el empleo de redes neuronales artificiales para la selección de recursos de manufactura y áreas de trabajo, así como algoritmos genéticos para la determinación de condiciones de operación (sección 4.6).

- Mediante el uso diagramas de clases UML, se definieron los modelos del producto, de manufactura y de catálogos (capítulo 5), necesarios para crear un sistema CAE. La figura 2.1 resume la relación proceso de configuración de maquinaria, arquitectura del sistema CAE y metodología empleada.
- Se definieron los requerimientos de información para proponer un sistema CAE (sección 3.2).
- Se propone una arquitectura para el desarrollo de la herramientas computacionales que asista la configuración de máquinas (capítulo 4).
- Los modelos de información fueron implementados en una base de datos orientada a objetos llamada ObjectStore (capítulo 5), y se programó una interfase en Visual C++ (capítulo 6), para capturar los datos del caso de estudio en los modelos de información.
- Se estableció un caso de estudio que muestre, no solo la configuración de la maquinaria, sino también el impacto que ésta tiene vista desde la producción, el costo y la calidad. (capítulo 6).
- Finalmente se generaron las conclusiones de la investigación.





Función del proceso	Elemento del sistema CAE	Metodología empleada	Descripción
A1 "Representar Información"	<ul style="list-style-type: none"> <li>Modelo del producto</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>IDEF0</li> <li>Análisis orientado a objetos</li> <li>UML</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sección 4.1</li> </ul>
A2 "Determinar áreas de trabajo"	<ul style="list-style-type: none"> <li>Aplicación (Módulo 1)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>IDEF0</li> <li>Redes neuronales artificiales</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sección 4.4</li> </ul>
A3 "Determinar recursos de manufactura"	<ul style="list-style-type: none"> <li>Aplicación (Módulo 1 y 2)</li> <li>Modelo de catálogos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>IDEF0</li> <li>Redes neuronales artificiales</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sección 4.4</li> <li>Sección 4.3</li> </ul>
A4 "Definir condiciones de operación"	<ul style="list-style-type: none"> <li>Aplicación (Módulo 2)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>IDEF0</li> <li>Algoritmos genéticos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sección 4.4</li> </ul>
A5 "Representar recursos de manufactura"	<ul style="list-style-type: none"> <li>Modelo de manufactura</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>IDEF0</li> <li>Análisis orientado a objetos</li> <li>UML</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sección 4.2</li> </ul>

Figura 2.1 Relación Proceso-Arquitectura-Metodología en la configuración de maquinaria.

## **Capítulo 3 La configuración de maquinaria**

En este capítulo se describe el proceso de configuración de maquinaria y las herramientas empleadas en su desarrollo. En la primera sección se presenta en forma general el proceso, para después en las siguientes detallar cada función involucrada.

### 3.1 La configuración de maquinaria.

La configuración de maquinaria es un proceso mediante el cual se determinan las máquinas herramientas, los herramientas de corte y sujeción, así como las condiciones de operación adecuadas para producir una pieza cumpliendo con las especificaciones de diseño y manufactura. La figura 3.1 ilustra la definición de configuración de maquinaria.



Figura 3.1 Configuración de maquinaria

Lo anterior considera que tanto las especificaciones de diseño, los recursos de manufactura y las condiciones de operación, forman un conjunto de elementos dependientes entre sí, que deben determinarse simultáneamente buscando la mejor relación producción costo calidad. Al manufacturar un producto por arranque de viruta se requiere de un proceso (torneado, fresado, etc). El proceso lo realiza una máquina herramienta que usa herramientas de corte y de sujeción, entre otros aditamentos, y todos requieren condiciones específicas a las cuales tiene que operar. Tales condiciones están relacionadas con la capacidad técnica de operación de los recursos de manufactura, con las especificaciones de diseño y manufactura (acabado superficial, tolerancias, etc.) y los requerimientos del cliente (costo, calidad, producción etc.). De esta manera el producto, los procesos, los recursos de manufactura y las condiciones de operación están estrechamente relacionados.

La figura 3.2 muestra la dependencia entre elementos de la configuración de maquinaria.

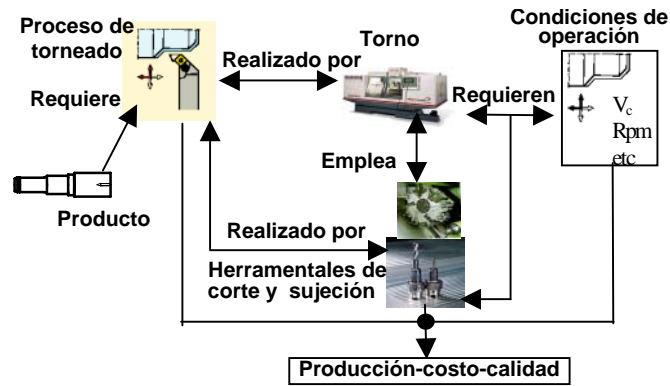


Figura 3.2 Dependencia entre elementos de la confirmación de maquinaria

Un aspecto relevante en la configuración de maquinaria, es integrar y compartir la información relacionada con el producto y con los recursos de manufactura, para asistir la toma de decisiones durante el proceso que conducirá a configurar una máquina. La integración de la información en esta investigación consiste, en el almacenamiento en un depósito (base de datos) de la información que describe y representa a un producto, de las instalaciones de manufactura y de la información comercial sobre recursos de manufactura. Con la información integrada, cada unidad de la organización de una empresa puede tener acceso a información relevante que le permitirá realizar sus tareas eligiendo las mejores alternativas, comprendiendo el impacto que sus acciones tendrán en otras partes de la organización. Así, para configurar maquinaria, esta investigación propone un proceso y una herramienta computacional que incluye:

1. La representación de la información de un producto en una estructura que le permite ser compartida.
2. La representación de la información de recursos de manufactura proporcionada por fabricantes.
3. Un proceso y técnicas para determinar y seleccionar un conjunto de recursos, y los correspondientes parámetros de operación, en forma simultánea.
4. La representación de la capacidad de manufactura de la configuración determinada.

Es importante destacar que, aunque trabajos reportados en el capítulo 1 abordan algunos de estos aspectos, ninguno lo hace de forma integral.

En la siguiente sección se describe el proceso propuesto y las herramientas empleadas en el desarrollo de la configuración de maquinaria.

### 3.2 El proceso de configuración de maquinaria

Aunque el proceso de configuración de maquinaria propuesto en esta investigación es aplicable en diversos casos, aquí sólo se enfoca a procesos de arranque de viruta por medio de máquinas herramientas para partes rotacionales.

Para definir la información requerida se empleó IDEF0 (Kimble 1997), con el cual se modelan las actividades principales y su flujo de información. IDEF0 consiste de un conjunto de diagramas que forman una descripción jerárquica, empezando con un alto grado de abstracción en el nivel más alto de los diagramas hasta lo más detallado en la parte baja. A través de los diagramas desarrollados por el autor se identificaron tres categorías de información para apoyar el proceso de configuración de maquinaria;

- i) La información relacionada con el producto,
- ii) La capacidad de manufactura de las instalaciones actuales existentes y
- iii) La información comercial de recursos de manufactura.

La figura 3.3 muestra el diagrama con las funciones principales del proceso de configuración de maquinaria.

El proceso parte de la interpretación de los datos de diseño (del plano de fabricación), para especificar una serie de recursos de manufactura organizados de acuerdo a la estructura de un modelo de manufactura. El proceso está constituido por cinco funciones principales; representar información del producto, determinar áreas de trabajo, determinar recursos de manufactura, definir condiciones satisfactorias y representar recursos de manufactura.

Cada una de las funciones se describe a continuación, el resto de los diagramas IDEF0 se muestran en el apéndice A.

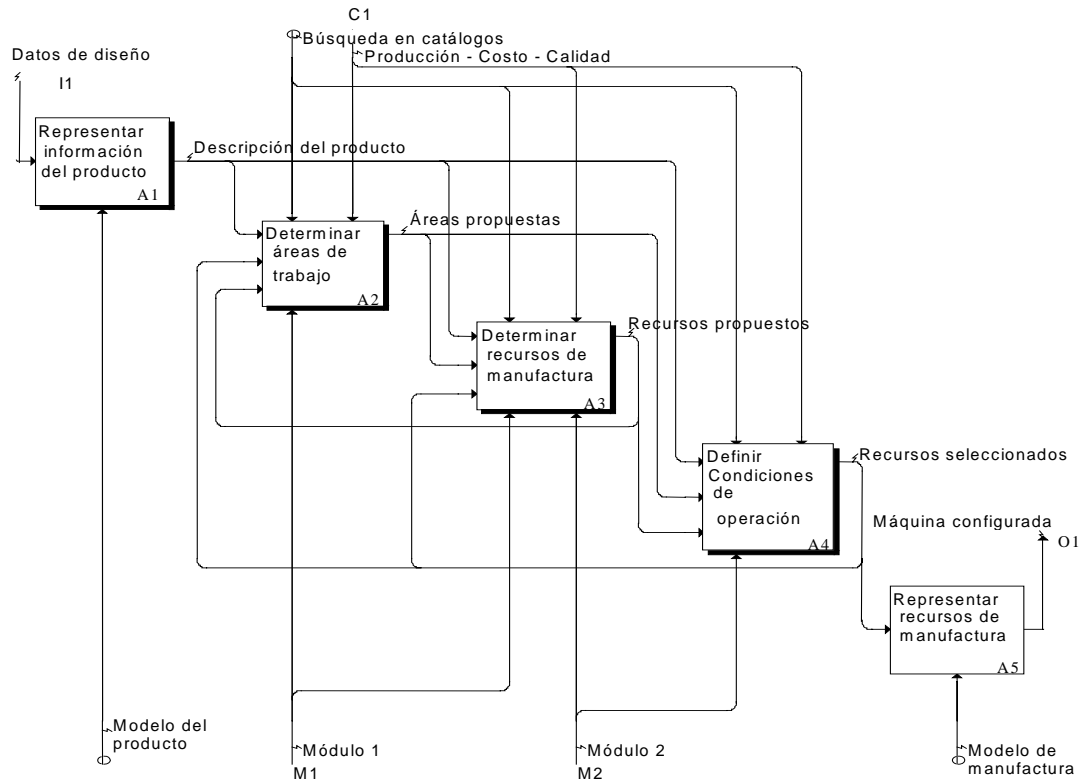


Figura 3.3. Diagrama IDEF0 con el proceso de configuración de maquinaria

**Función A1 “representar información del producto”.** Para realizar esta función se emplea una estructura computacional orientada a objetos (modelo del producto), en donde se organizan los datos que describen al producto contenidos en el plano de fabricación y en los requerimientos de manufactura.

**Función A2 “determinar áreas de trabajo”.** Un proceso de arranque de viruta y sus correspondientes condiciones de operación definen un área de trabajo. La función A2, alimentada con datos de la función A1 (modelo del producto), determina el proceso y las condiciones de operación, proponiendo una área de trabajo para manufacturar un producto en particular.

**Función A3 “determinar recursos de manufactura”.** La función A3 selecciona los recursos de manufactura requeridos concurrentemente, observando la accesibilidad y compatibilidad entre ellos. La accesibilidad implica que los recursos de manufactura no interfieran entre sí para predecir posibles problemas, por ejemplo, la colisión entre un cortador y una mordaza en un torno. La compatibilidad asegura que los recursos de manufactura determinados satisfagan las operaciones requeridas, por ejemplo, que la fuerza de sujeción de una mordaza sea capaz de soportar a las fuerzas de corte. La función A3, se alimenta con información de las funciones A1 y A2, de los módulos 1 y 2. El módulo 1 contiene la

información para proponer un grupo de recursos, mientras que el módulo 2 tiene algoritmos que buscan en catálogos los recursos propuestos por el módulo 1 y evalúan su capacidad para manufacturar una pieza específica.

***Función A4 “definir condiciones satisfactorias”.*** Una condición satisfactoria es un conjunto de condiciones de operación que garantizan, la máxima ejecución técnica de los recursos de manufactura para alcanzar un balance entre la producción, el costo y la calidad. Las condiciones de operación satisfactorias se constituyen por tres variables; velocidad de corte, profundidad de corte, alimentación. En esta función se realiza una evaluación desde un punto de vista técnico económico para encontrar la mejor combinación de recursos de manufactura y condiciones de operación, que cumplan con las restricciones de producción impuestas. La función A4 se alimenta con datos de las funciones A1, A2, A3, emplea el módulo 2 y determina: i) el costo involucrado en la manufactura de una parte, ii) el tiempo de producción y iii) asegura la calidad solicitada en las especificaciones de la pieza, buscando un equilibrio entre los recursos de manufactura y las condiciones de operación. Un balance entre las metas mencionados se logra mediante un proceso de optimización con tres funciones objetivo y cuatro variables de decisión, que permitan encontrar el mínimo costo de producción, el mínimo tiempo de producción y la máxima calidad en una pieza. Como resultado de la función A4, se tiene a los recursos de manufactura y a sus respectivas condiciones de operación para manufacturar una pieza.

***Función A5 “representar recursos de manufactura”.*** Una vez que los recursos y procesos han sido seleccionados, son representados en el modelo de manufactura, capturando las instalaciones ( estación, celda, taller, fábrica) en términos de sus procesos y recursos

### 3.3 Desarrollo de funciones del proceso de configuración de maquinaria.

En las siguientes secciones se describe en forma detallada las herramientas y procedimientos empleados en el desarrollo del proceso de configuración de maquinaria.

#### 3.3.1 Función A1 Representar información

La función A1 se refiere a la representación de la información del producto y se hace de acuerdo a la estructura del modelo del producto, la cual se describe en la sección 4.1. La información es almacenada en una implementación del modelo del producto en una base de datos (*Object store*) con una interfase desarrollada en Visual C++.

El producto es descompuesto en primitivas y en sus relaciones de ensamble de acuerdo a una librería que es parte del modelo. Las características son definidas dependiendo de su funcionalidad, descripción física y de su información de manufactura. La figura 3.4 ilustra la descripción física de una característica cilíndrica.

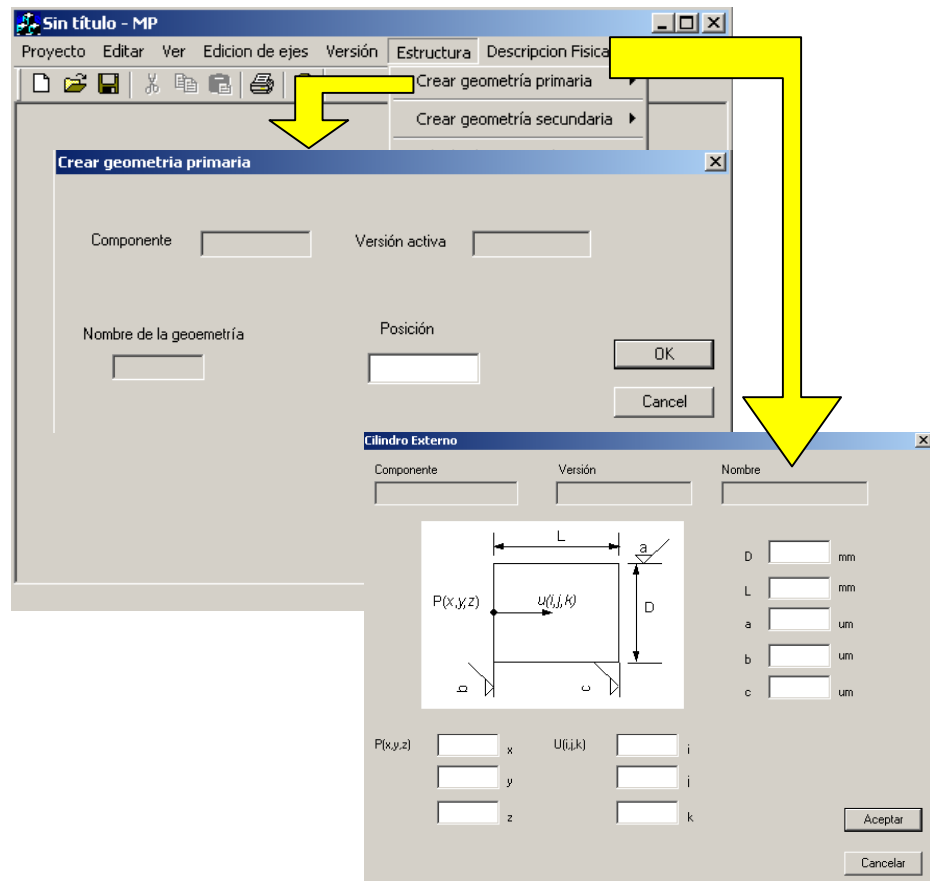


Figura 3.4. Representación de datos en el modelo del producto



**3.3.2 Función A2 Determinar áreas de trabajo.**

Un área de trabajo es un rango de valores dentro los cuales se define un proceso de corte por arranque de viruta. En esta parte de la configuración de maquinaria, se determina él o los procesos de manufactura necesarios para producir cada una de las características de un producto y se proponen rangos de operación.

La determinación de las áreas de trabajo se realiza empleando la información contenida en una herramienta computacional llamada Módulo 1.

El Módulo 1 interactúa con el modelo del producto y por medio de un grupo de redes neuronales determina, procesos, recurso y propone las condiciones de operación a las cuales se tiene que operar. La figura 3.5 muestra las acciones básicas realizadas por el módulo 1.

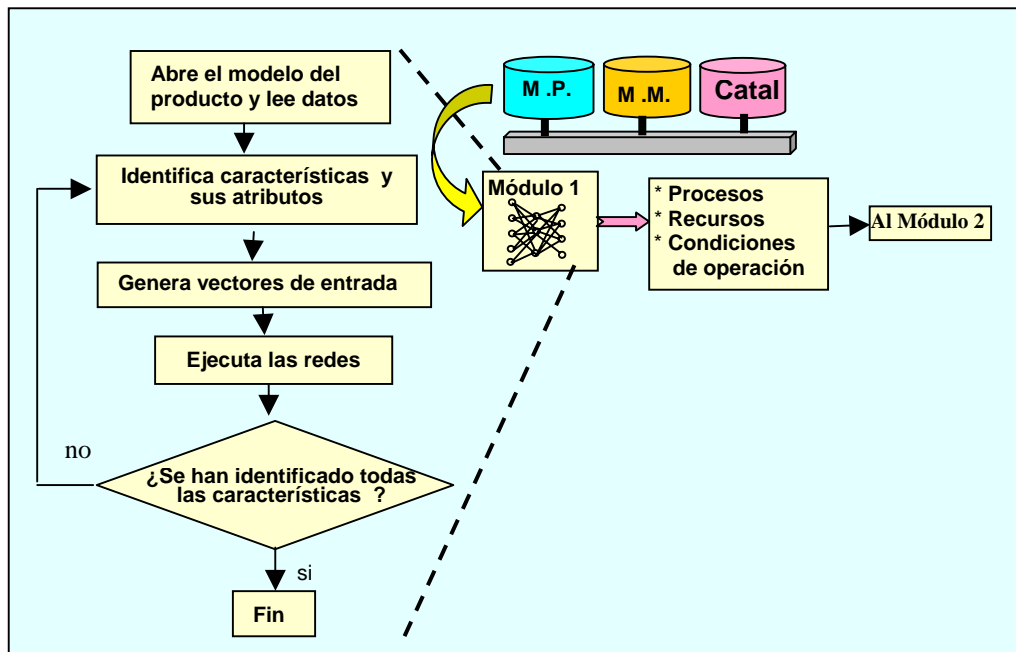


Figure 3.5 Módulo 1

El Módulo 1 abre el modelo del producto, lee los datos de la descripción física del producto y la descripción del material para definir los vectores de entrada de las redes neuronales.

La información contenida en este módulo está basada en el conocimiento adquirido por expertos en maquinados y en la recopilación de datos de libros y manuales de manufactura. El conocimiento se refiere a la información que una persona usa para interpretar, predecir y responder apropiadamente, a un problema específico. Por lo general, el conocimiento se ha expresado e incorporado a sistemas expertos de manufactura, por medio de un conjunto de

reglas lógicas del tipo “*if—then*”, la codificación de estas reglas es línea por línea en el argumento del programa, de modo que, cualquier modificación a una regla implica la modificación del programa original, por lo tanto, no se puede ampliar el dominio de conocimiento a menos que se modifique el programa fuente. La configuración de maquinaria emplea reglas y conocimiento heurístico que no puede ser expresado en reglas explícitas como las requeridas por un sistema experto. Debido al tipo de información y datos que se manejan, esta investigación ha decidido emplear redes neuronales artificiales, por la capacidad que tienen para clasificar y aprender de un mapeo arbitrario entre un espacio de entrada y uno de salida, además de tener la capacidad de modificar su comportamiento en respuesta a su entorno.

Las redes neuronales se han venido utilizando y demostrado su aplicación en el área de diseño y manufactura, principalmente, en la determinación de secuencias de operación y reconocimiento de características (primitivas). La capacidad de generalización de estas redes las hace más poderosas que los sistemas expertos clásicos, pueden exhibir el comportamiento de las cadenas de reglas contenidas en la base de conocimiento de un sistema experto, sin contener ninguna representación explícita de las mismas reglas.

La arquitectura de las redes empleadas en la configuración de maquinaria es del tipo multicapas (tres capas) con propagación hacia delante (*feedforward*) y entrenamiento supervisado del tipo *backpropagation*.

Todas las redes neuronales empleadas están agrupadas en el llamado Módulo 1, que es parte de la aplicación software. El Módulo 1 es el mecanismo (ver figura 3.3) para determinar las áreas de trabajo y los recursos de manufactura.

### **3.3.2.1 Red *back propagation***

El funcionamiento de una red *backpropagation* consiste en un aprendizaje de un conjunto predefinido de pares *entradas-salidas* dados como ejemplos, empleando un ciclo de *propagación-adaptación* de dos fases. Primero se aplica un patrón de entrada como estímulo para la primer capa de neuronas de la red, la cual se va propagando a través de las capas superiores hasta generar una salida. Se compara el resultado obtenido con el deseado y se calcula un valor de error para cada neurona de salida. El error sirve para modificar los pesos de las neuronas (ver sección 1.2.6). Enseguida el error se transmite hacia atrás, partiendo de la capa de salida hacia las neuronas de la capa intermedia, las cuales reciben el porcentaje de error aproximado a la participación de la neurona intermedia en la salida original.

Este proceso se repite en cada capa hasta que todas las neuronas de la red reciban el error que describa su aportación relativa al total. Basándose en el error recibido, los pesos de las

conexiones de cada neurona se reajustan, de modo que en la siguiente ocasión que se presente el mismo patrón, la salida sea más próxima a la deseada, con lo cual el error disminuye.

La importancia del entrenamiento *backpropagation* radica en la capacidad para adaptar los pesos de las neuronas de las capas intermedias, para aprender la relación existente entre un conjunto de patrones dados como ejemplos y sus salidas. Además puede proporcionar salidas satisfactorias a entradas que el sistema no ha visto nunca durante la fase de entrenamiento. La figura 3.5 muestra la estructura de red neuronal de tres capas, tanto las entradas como las salidas son conocidas, los patrones de entrada se ajustan para dar los valores deseados. El algoritmo de entrenamiento *backpropagation* se presenta en el apéndice B.

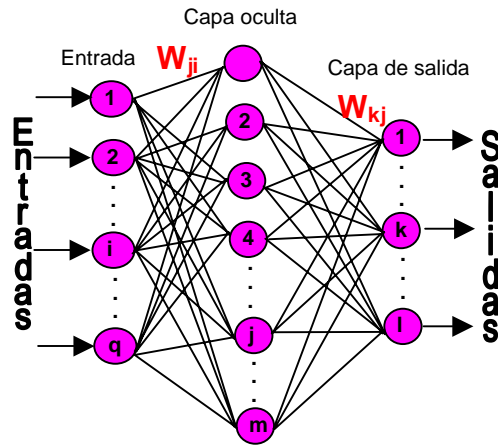


Figura 3.5. Estructura de la red de tres capas con entrenamiento *backpropagation*.

En las siguientes secciones se describen los patrones empleados por cada una de las redes empleadas.

### 3.3.2.2 Implementación de la red neuronal en la determinación de las áreas de trabajo

Los patrones de entrenamiento fueron generados con base, como se dijo anteriormente, en el conocimiento de expertos, manuales, libros y prácticas de manufactura, y dentro de la red están compuestos por valores entre 0 y 1. Cuando se genera un patrón, los nodos correspondientes a los valores que son usados positivamente están representados por un 1, los restantes son 0.

La tabla 3.1 muestra los vectores de entrada y salida que se emplean en la red neuronal que determina las áreas de trabajo.

Vector de entrada		Vector de salida	
Nodo	Rango	Nodo	Rango
Característica	{ Cilindro, radio, cono }	Desbaste	{ $x/\text{min}-D < x < \text{max}-D$ }
Tolerancia	{ $x/\text{min}-\text{tol} < x < \text{max}-\text{tol}$ }	Medio	{ $x/\text{min}-M < x < \text{max}-M$ }
Acabado superficial	{ $0 < x < \text{max}-\text{as}$ }	Fino	{ $x/\text{min}-F < x < \text{max}-F$ }
		Operación	{ refrentado, chaflán, etc }

as = acabado superficial, tol = Tolerancias, D = desbaste, M = medio, F = fino.

Tabla 3.1. Vectores de entrada y salida para determinar áreas de trabajo.

El vector de entrada está integrado por requerimientos de diseño, el de salida define los procesos y las condiciones de operación sugeridas para realizarlo.

Entre los elementos que constituyen al vector de entrada se encuentran las características geométricas (primitivas), las cuales auxilian la definición del proceso de maquinado y por lo tanto la máquina herramienta. El vector de entrada también considera las tolerancias y acabado superficial, ambos se relacionan con las condiciones de operación requeridas para realizar las características geométricas de una pieza, e influyen en la definición de rangos de valores para la velocidad de corte, profundidad de corte y alimentación.

Los patrones se generan de acuerdo a lo siguiente, la tabla 3.2 muestra los rangos de valores que definen las condiciones de operación.

Área de trabajo	Símbolo	F [mm/rev]		$a_p$ [mm]		$R_a$ [ $\mu m$ ]	
		min.	Máx.	min.	Máx.	min.	Max.
Fino	FN	0.05	0.15	0.25	2.0	0.09	1.4
Medio	MD	0.2	0.5	1.5	4.0	1.25	10.3
Burdo	RG	0.5	>	6	2.0	6	70

F = alimentación,  $a_p$  = profundidad de corte,  $R_a$  = rugosidad

Tabla 3.2. Rango de valores de las áreas de trabajo

Considérese a la figura 3.6 para mostrar un ejemplo de área de trabajo, la cual está constituida por cuatro características cilíndricas y una ranura y requieren de un acabado superficial de  $4\mu m$ .

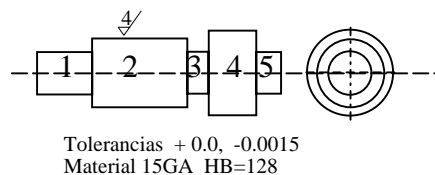


Figura 3.6. Flecha

La característica 2 es cilíndrica y su rugosidad está entre 1.25 y 10.3  $\mu\text{m}$ , la tabla 3.3 nos indica que requiere un proceso de corte externo longitudinal esto debido al tipo de característica, y para ello condiciones de corte medio.

Entradas								Salidas							
Número	Característica					Tolerancia [mm]	Acabado Superficial [ $\mu\text{m}$ ]	Desbaste	Medio	Fino	Externo Longitudinal	Refrentado	Chaflán	Perfil	Ranurado
	Cilindro	Perfil	Ranura	Chaflán	Cilindro										
1	1	0	0	0	0	0.005	4	0	1	0	1	0	0	0	0
<b>2</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0.005</b>	<b>4</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
3	0	0	1	0	0	0.005	4	0	1	0	0	0	0	0	1
4	1	0	0	0	0	0.005	4	0	1	0	1	0	0	0	0
5	1	0	0	0	0	0.005	4	0	1	0	1	0	0	0	0

Tabla 3.3. Ejemplo de patrones de entrada

Uno de los vectores se presenta en la tabla 3.4, el número 1 indica que se usa positivamente, los 0 representan parámetros no empleados. La definición de las características se presenta en el modelo del producto sección 4.1 .

Vector de entrada							Vector de salida							
1	0	0	0	0	0.005	0.4	0	1	0	1	0	0	0	0

Tabla 3.4 Patrón de salida.

Los valores que constituyen un área de trabajo para una **característica cilíndrica con un acabado superficial de 4  $\mu\text{m}$** , requieren un proceso de corte **externo longitudinal medio** con condiciones de operación de alimentación  $f_m= 0.2$  y  $f_M= 0.5$ , [mm/rev] y profundidad de corte  $a_m= 1.5$   $a_M = 4.0$  [mm]. Estos datos son tomados de la tabla 3.3 y entregados por la función 2.

### 3. 3.3 Función 3 Determinación de recursos de manufactura

Se encarga de determinar insertos, porta insertos, y el tipo de máquina herramienta.

### 3.3.3.1 Selección de máquinas herramientas

La selección de las máquinas herramientas se realiza por medio de una red neuronal artificial. La arquitectura es similar a la encargada de determinar las áreas de trabajo, es de tres capas con propagación hacia delante y entrenamiento supervisado del tipo *backpropagation*.

En el vector de entrada se incluyen atributos de la pieza y del proceso como son; la geometría de la pieza, tamaño del material (en bruto, sin procesar), el acabado superficial, tolerancias y las operaciones requeridas. La geometría de la pieza permiten definir el tipo de máquina y el tamaño de la mesa o bancada, las tolerancias influyen en la precisión de la máquina herramienta, las operaciones tiene influencia en los rangos de operación. De modo que el vector de salida está constituido por el tipo de máquina, tamaño de la mesa o bancada, precisión y rango de operación.

Patrones de entrenamiento en la selección de maquinaria			
Vector de entrada		Vector de salida	
Nodo	Rango	Nodo	Rango
Pieza	{ISO.....}	Tipo de máquina	{torno, fresa, centro}
Tamaño pieza.	{x/0<x<max-T}	Tamaño de mesa o bancada.	{x/x<max-T}
Tolerancia	{x/0<x<max-tol}	Capacidad de carga	{x/x<max-cc}
Acabado superficial	{x/0<x<max-as}	Rango de velocidad	{x/x<max-V}
Operación	{x/0<x<1}	Rango de alimentación	{x/x<max-f}
		Precisión mínima	{alta – media – baja}

T = Tamaño de la pieza, tol = tolerancia, as = acabado superficial, cc = capacidad de carga, V = velocidad, f = alimentación.

Tabla 3.4. Patrones de entrenamiento para la red encargada de seleccionar máquinas

La red neuronal en su vector de salida indica el tipo de máquina (torno o fresadora), tamaño de bancada o mesa, precisión requerida y rangos de operación, con estos datos se inicia la búsqueda en el catálogo de máquinas (ver sección 4.3). Las máquinas encontradas corresponderán a los diferentes fabricantes incluidos en los catálogos, sus datos son almacenados en un archivo junto con el resto de recursos de manufactura para posteriormente ser evaluados.

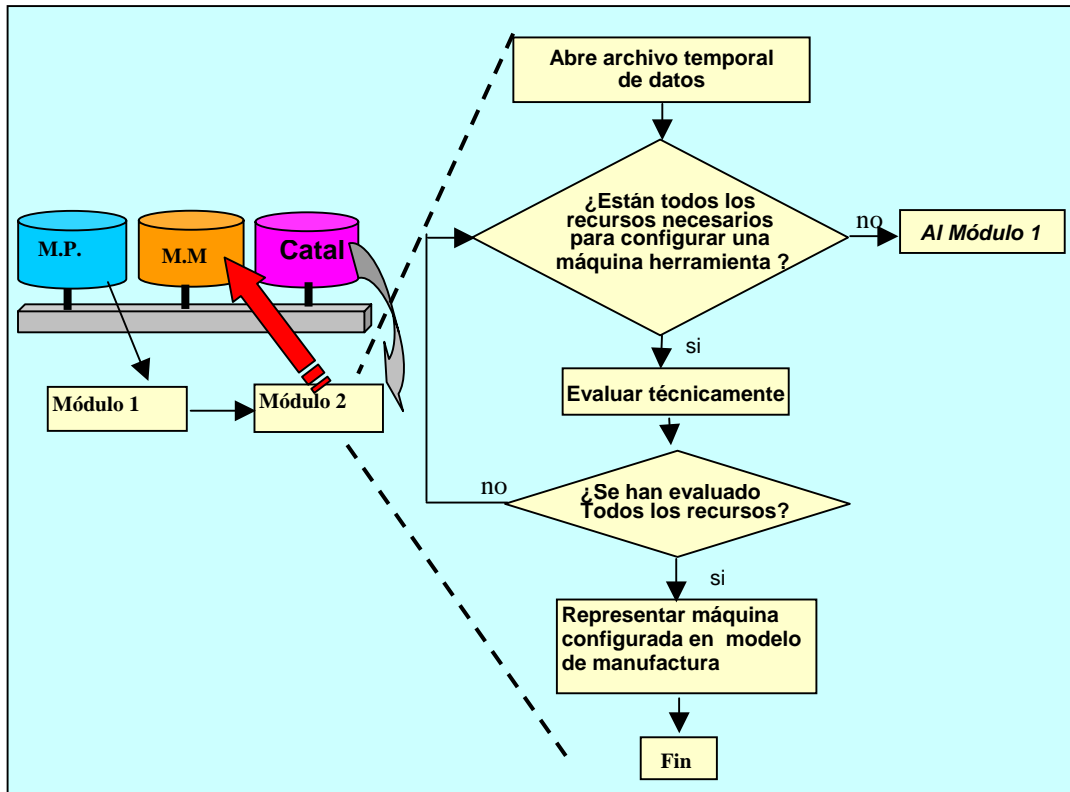


Figura 3.7 Módulo 2.

La búsqueda en los catálogos de máquinas herramientas se realiza usando el diagrama mostrado en la figura 3.7, el cual pertenece al Módulo 2.

El Módulo 2 es una parte de la aplicación de software que realiza la búsqueda en los catálogos de los recursos propuestos por las redes neuronales y evalúa su funcionamiento. Recibe información del módulo 1, interactúa con el modelo de catálogos y el de manufactura. Su operación se muestra en la figura 3.7.

### 3.3.3.2 Determinación de los insertos y porta insertos

La selección de los cortadores es específicamente para un proceso de torneado. La selección se realiza por medio de dos redes neuronales artificiales. Una de ellas maneja lo relacionado al material de fabricación de la pieza y otra lo de la geometría, son redes de tres capas con entrenamiento *backpropagation*.

Una de las redes en el vector de entrada incluye parámetros correspondientes al tipo de material de trabajo, dureza del material, acabado superficial, mientras que en el vector de

salida entrega los datos correspondientes a la herramienta de corte como son: material, grados de recubrimiento, radio de nariz y geometría. La clasificación del material, así como de los grados de recubrimiento, están basados en la clasificación ISO. La otra red determina la clasificación del cortador, también de acuerdo a los estándares ISO. En su vector de entrada la red tiene datos del tipo de primitiva, de los ángulos de entrada, de copiado y del corte, el vector de salida está compuesto por la forma del cortador ( Cuadrada, Rómbica, Triangular, etc.), el ángulo del claro, la tolerancia y tipo de inserto. La tabla 3 muestra los vectores de entrada y salida correspondientes a la red de selección de cortadores y la figura 3.8 los datos que entrega la red neuronal que determina el inserto.

Patrones de entrenamiento en la selección de cortadores			
Vector de entrada		Vector de salida	
Nodo	Rango	Nodo	Rango
Material	{ISO.....}	Material del inserto	{C, CC, Cer, CBN, PD}
Dureza	{x/min-BIS<x<max-BHS}	Grados de recubrimiento	{x/Rmin<x<Rmax}
Acabado superficial	{x/0<x<max-as}	Radio de nariz	{F, M, D}
		Geometría	

as = acabado superficial, R = rugosidad, F = fino. M = medio, D = desbaste

Tabla 3.5. Patrones de entrenamiento para la red encargada de seleccionar insertos

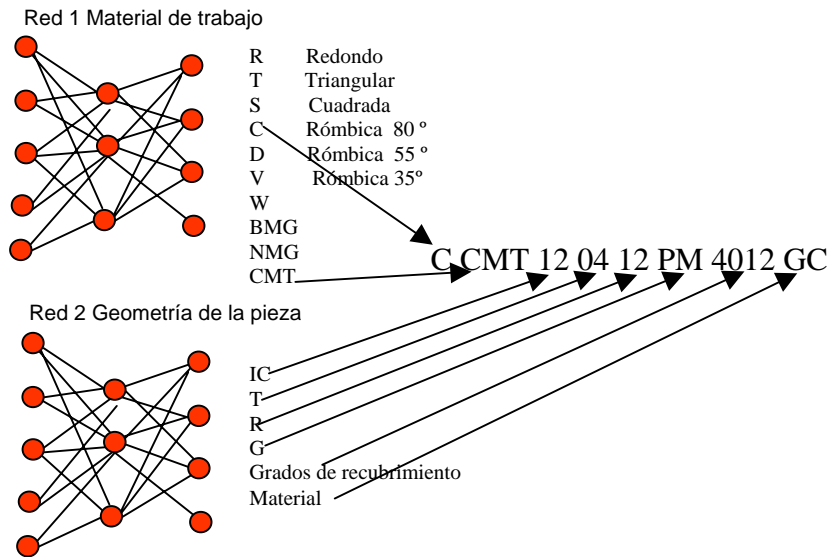


Figura 3.8 Datos entregados por las redes de insertos.



Las dos redes juntas proporcionan el código de un inserto de acuerdo a la clasificación ISO. Con el código definido anteriormente se realiza una búsqueda en los catálogos de insertos. El diagrama se muestra en la figura 3.9 junto con el de seleccionar máquinas y es parte del Módulo 2. La figura 3.10 muestra una pantalla con la aplicación de software.

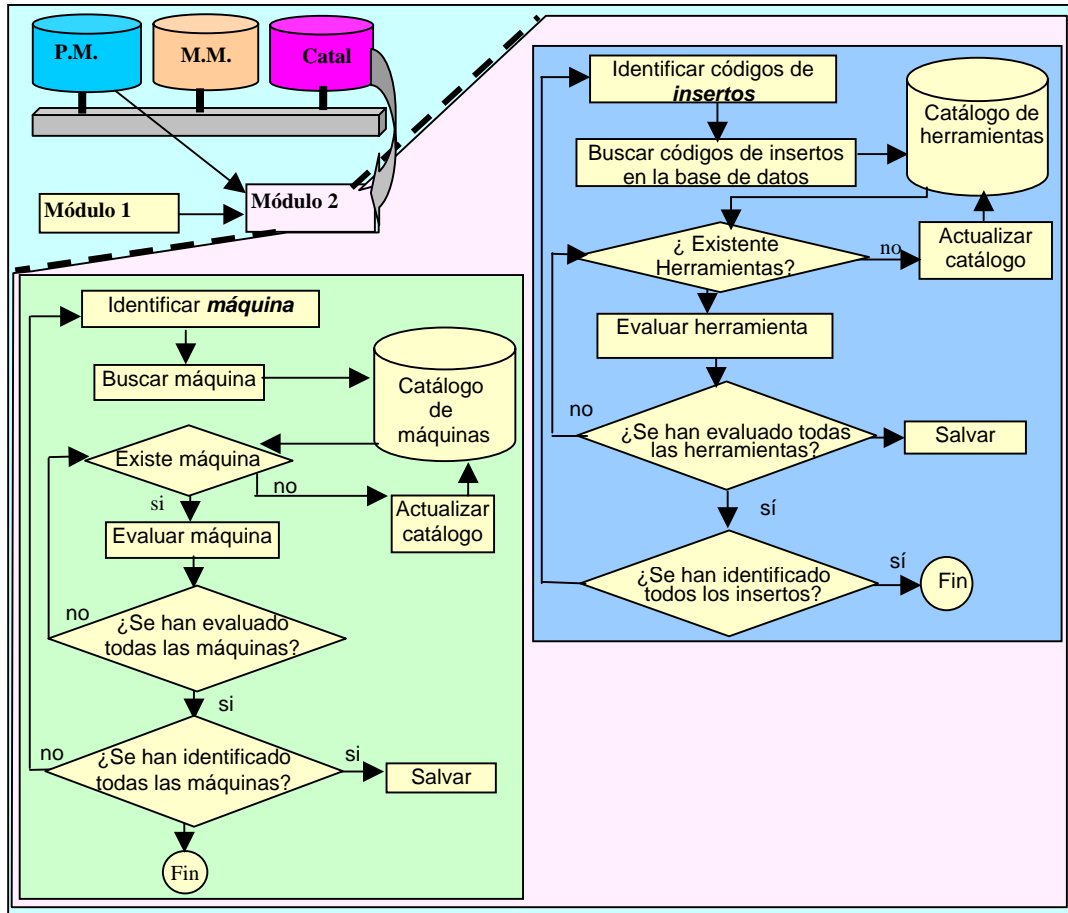


Figura 3.9 Diagrama de flujo para seleccionar máquinas e insertos

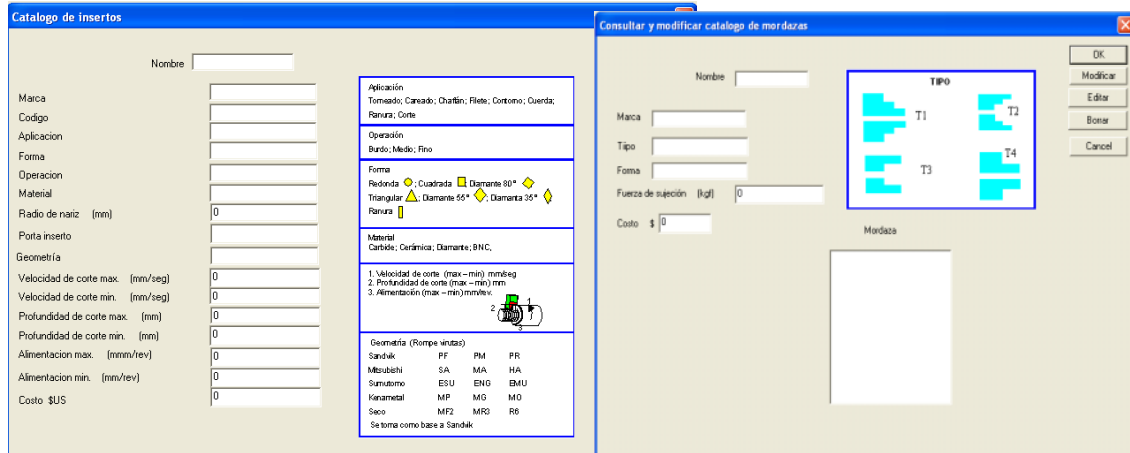


Figura 3.10 Pantalla del catálogo de insertos y de máquinas.

Con los datos proporcionados por los catálogos, se crea una lista con la información de los insertos encontrados.

Hasta este punto se tienen dos grupos de condiciones de operación, una proporcionada por la función 2 “determinar áreas de trabajo” y la que se obtiene de los catálogos. De los datos se toman los valores máximos (si existe más de uno y si no se toma el máximo) y de ellos se elige el menor para realizar cálculos complementarios, entre los que están:

- Fuerzas principales de corte  $F_c$  [N] y con ella se buscan elementos de sujeción.
- La potencia requerida para complementar la información de selección de máquinas.
- El máximo volumen removido  $Q$  [cm<sup>3</sup>/min]. Este valor calculado para toda solución aceptable es un criterio decisivo, el mayor volumen es el mejor.

Con la función 2 se ha obtenido información para obtener recursos de manufactura tales como;

- Máquina
- Insertos y porta insertos
- Elementos de sujeción

### 3.3.4 Función 4 Definir condiciones satisfactorias

La determinación de las condiciones satisfactorias es una forma de asegurar la máxima operación técnica de los recursos de manufactura, y la eficiencia de producción. En su definición se consideran tres variables de decisión: velocidad de corte, profundidad de corte, la alimentación. Estas tres variables tienen influencia directa sobre la productividad en la

fabricación de piezas por arranque de viruta. La figura 3.11 muestra la influencia que la velocidad de corte tiene sobre la productividad.

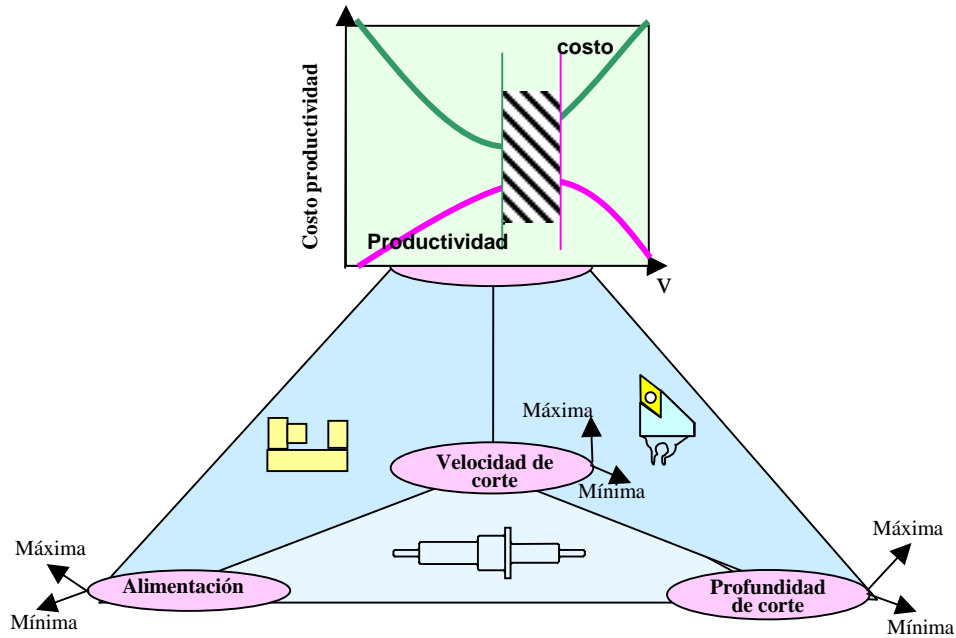


Figura 3.11 Influencia de la velocidad de corte en la productividad

Puede observarse que cuando la curva de costo está en su mínimo y la de productividad al máximo, sus extremos no coinciden para un mismo punto de velocidad. El área sombreada es conocida como *área de alta eficiencia (HI-E High Efficiency area)*, dependiendo de la estrategia que se busque, ya sea trabajar con el costo más bajo, producir lo más que se pueda o una combinación de ambas, deben de buscarse las condiciones de operación dentro de esa área.

En el modelado del proceso de maquinado empleado en la configuración de maquinaria, se utiliza el criterio de máxima calidad del producto minimizando el costo y el tiempo de producción. El modelo matemático se describen en la siguiente sección, y es resuelto por medio de un proceso de optimización de múltiples criterios.

#### 3.3.4.1. Formulación del problema de determinación de condiciones de operación

La determinación correcta de las condiciones de operación es un componente clave en la planeación del proceso de manufactura. En la configuración de maquinaria se tienen tres objetivos en conflicto; volumen de producción, el costo de operación y la calidad de

maquinado. Los tres objetivos antes mencionados están representados en función de la velocidad de corte, la alimentación, la profundidad de corte y el número de pasos. La selección de tales parámetros tiene un impacto directo sobre la producción en el proceso de arranque de viruta, juega un papel importante en el incremento de la producción y competitividad. La determinación de las condiciones de operación adecuadas es un problema de optimización no lineal con restricciones, consiste básicamente en la determinación de un conjunto óptimo integrado por la velocidad, alimentación y profundidad de corte para satisfacer un objetivo económico con varias restricciones impuestas.

Las condiciones de operación deben ser seleccionadas para que una máquina herramienta trabaje a su máxima capacidad de operación y la vida útil de la herramienta de corte se prolongue lo máximo posible. Si la velocidad de corte, alimentación y profundidad de corte se reducen, la eficiencia del trabajo disminuye y la resistencia de la herramienta al desgaste se prolonga. De esta manera la herramienta de corte se protege y el costo por reemplazo de herramienta es reducido, pero el costo de la estación de trabajo se incrementa, (el costo de la herramienta sólo representa el 10% del total del maquinado, Sandvik 2005). Inversamente, no siempre es la intención producir dentro del tiempo de producción más corto. Cuando las condiciones de operación son seleccionadas para una operación de maquinado, se busca un compromiso entre la máxima remoción de material y el mínimo desgaste de la herramienta. El propósito de esta optimización es determinar un conjunto de condiciones de operación que satisfaga los límites de la ecuación objetivo y el balance entre los objetivos en conflicto.

### 3.3.4.2 Modelo matemático

Los parámetros que se buscan están basados en alcanzar el mínimo costo de operación, el mínimo tiempo de producción y la calidad deseada en los planos de producción.

- Costo unitario de producción

El costo unitario de producción  $C_{up}$  estará determinado por.

$$C_{up} = C_m + C_c + C_h + C_p \quad (1)$$

donde:

$C_m$  = Costo del maquinado.

$C_c$  = Costo por reemplazo de la herramienta de corte.

$C_h$  = Costo de la herramienta

$C_p$  = Costo por tiempo de preparación

- Costo por maquinado se determina con la ecuación.

$$C_m = k_t * t_m$$

donde

$k_t$  es el costo del operador de la máquina herramienta (\$/min)

$t_m$  el tiempo de maquinado (min)

El tiempo de maquinado se define por

$$t_m = \frac{\pi DL}{1000Vf} \times (n) \quad \text{donde;} \quad (2)$$

$V$  = Velocidad de corte

$f$  = La alimentación

$D$  = diámetro del maquinado

$L$  = La longitud axial del corte

$n$  = El número de pasadas y depende de la profundidad de corte.

El costo por maquinado estará determinado por

$$C_m = k_t \left[ \frac{\pi DL}{1000} \left[ \frac{1}{Vf} (n) \right] \right] \quad (3)$$

La configuración de maquinaria considera pasadas de corte con igual profundidad. El número de pasadas está determinado por la profundidad total de corte, es decir el material que se tiene que remover, dividido entre los límites inferior y superior de la profundidad de corte definida en el catálogo del fabricante, de modo que el número de pasos estará en el

rango de  $\left( \frac{dM}{d_{\max}}, \frac{dM}{d_{\min}} \right)$  donde  $dM$  es la profundidad total de corte,  $d_{\max}$  y  $d_{\min}$  son la

profundidad máxima y mínima definidas en el catálogo para un inserto específico.

- Costo por tiempo de preparación

$$C_p = k_t * t_p$$

Se define por el costo del trabajador  $k_t$  multiplicado por el tiempo de preparación  $t_p$ . El

tiempo de preparación, se constituye por dos términos  $t_p = t_{cd} + t_{pe}$ , uno de ellos constante

definido por el tiempo empleado en las operaciones de carga y descarga  $t_{cd}$ , y otro variable debido al movimiento de posicionamiento de la herramienta de corte  $t_{pe}$ .

El tiempo de posicionamiento está en función del número de pasadas y la distancia recorrida, se determinara con la siguiente expresión,

$$t_{pe} = [v_a * L_r]n \quad (4)$$

$v_a$  es la velocidad de aproximación,  $L_r$  la distancia recorrida

El tiempo de preparación será  $t_p = [v_a * L_r]n + t_{cd}$ , y generan un costo en el maquinado

igual a; 
$$C_p = k_t [v_a L_r (n) + t_{cd}] \quad (5)$$

- Costo por reemplazo de la herramienta definido por.

$$C_c = k_t * t_{ch}$$

Está constituido por el tiempo de reemplazo de la herramienta  $t_{ch} = \frac{t_m}{T}$ , por el costo del trabajador  $k_t$ . El tiempo requerido para cambiar una herramienta está en función su vida útil

definida por,  $T = \frac{C}{v^{\frac{1}{n}} f^{\frac{1}{n_1}} d^{\frac{1}{n_2}}}$ , del la ecuación 2 se hace  $t_m = K_1 = \frac{\pi D L n}{1000 v f}$  y sustituyendo

en  $t_{ch}$ , junto con T, se obtiene el tiempo por reemplazo de herramienta

$$t_{ch} = \left( K_1 v^{\frac{1}{n}-1} f^{\frac{1}{n_1}-1} d^{\frac{1}{n_2}} \right) / C \quad (6)$$

Donde  $C, n, n_1$  y  $n_2$  son constantes de la herramienta para la vida útil.

Se considera que la vida de la herramienta es la misma en el corte burdo y fino.

Costo por reemplazo de la herramienta es por lo tanto ;

$$C_{ch} = K_t \left[ \left( K_1 v^{\frac{1}{n}-1} f^{\frac{1}{n_1}-1} d^{\frac{1}{n_2}} \right) / C \right] \quad (7)$$

Costo de la herramienta por pieza  $C_p = C_f \frac{t_m}{T}$

Está determinado por el costo por filo de la herramienta  $C_f$ . Una herramienta de corte puede tener más de un filo de corte, por el tiempo de maquinado entre la vida útil de la herramienta.

$$C_p = K_t \left[ \left( K_1 v^{\frac{1}{n}} f^{\frac{1}{n_1}} d^{\frac{1}{n_2}} \right) / C \right] + C_f \quad (10)$$

### 3.3.4.3 Funciones objetivo.

La primer función objetivo que se considera en el proceso de configuración de maquinaria corresponde al tiempo de producción. La función está constituida por los siguientes tiempos; el tiempo de maquinado  $t_m$ , de preparación  $t_p$ , y el de reemplazo de la herramienta de corte (duración de la herramienta)  $t_{ch}$ . La primer función objetivo  $obj[1]$  es la siguiente.

$$obj[1] = [K_1 v^{-1} f^{-1}(n)] + [(V_a * L_r)(n)] + 2 \left[ \left( K_1 v^{\frac{1}{n}} f^{\frac{1}{n_1}} d^{\frac{1}{n_2}} \right) \right] C$$

La segunda función objetivo corresponde al costo de producción, la integran los costos de maquinado, el de reemplazo de la herramienta, el de la herramienta y el de preparación. La función es la siguiente;

$$obj[2] = K_T [K_1 v^{-1} f^{-1}(n)] + K_T [(V_a * L_r)(n)] + K_t \left[ \left( K_1 v^{\frac{1}{n}} f^{\frac{1}{n_1}} d^{\frac{1}{n_2}} \right) / C \right] + K_t \left[ \left( K_1 v^{\frac{1}{n}} f^{\frac{1}{n_1}} d^{\frac{1}{n_2}} \right) / C \right] + C_f$$

La tercer función objetivo busca garantizar la calidad deseada y es

$$obj[3] = \frac{1000f^2}{8r}$$

- Variables del problema

Se han definido cuatro variables.

1.	Velocidad de corte	$v$	$v_{\min} \leq v \leq v_{\max}$
2.	Alimentación	$f$	$f_{\min} \leq f \leq f_{\max}$
3.	Profundidad de corte	$d$	$d_{\min} \leq d \leq d_{\max}$
4.	Número de pasos	$n$	$\frac{dM}{d_{\max}} \leq n \leq \frac{dM}{d_{\min}}$

Restricciones del problema

$$cstr[1] = \frac{k_1 f_f^\mu d_f^v V_f}{6120 \eta} - P_{\max} \quad \text{Restricción en la potencia.}$$

$P_{\max}$  = potencia máxima del motor

$\eta$  = Eficiencia

$$cstr[2] = obj[2] - R_m \quad \text{Restricción el acabado superficial.}$$

$R_m$  = Rugosidad máxima

$$cstr[3] = d * n - PC_t \quad \text{Restricción en la profundidad de corte.}$$

$PC_t$  = Profundidad total de corte

La optimización de las funciones objetivo se constituye por un conjunto de  $n$  parámetros (velocidad y profundidad de corte, alimentación y número de pasadas), un conjunto de  $k$  funciones objetivo ( $obj[1], obj[2], obj[3]$ ), y un conjunto de restricciones ( $cstr[1], cstr[2], cstr[3]$ ). Las funciones objetivo y las restricciones son funciones de las variables de decisión. El método utilizado se definió en el capítulo 1 sección 1.2.8. Los resultados se almacenan en un archivo tipo para ser consultados posteriormente.

### 3.3.4 Función 5 Representar recursos de manufactura

Representar recursos de manufactura, se hace de acuerdo a la estructura del modelo de manufactura, la cual se describe en la sección 4.2. La información, al igual que en el modelo del producto, es almacenada en una base de datos (Object store) con una interfase desarrollada en Visual C++.

El modelo de manufactura identifica, representa y captura los datos, información y conocimiento que describen a los recursos de manufactura, procesos y estrategias de una empresa en particular (Molina, 1999). El modelo captura la información en términos de las



capacidades de las instalaciones en diferentes niveles de abstracción, como lo son la estación, celda, taller y fábrica. La representación estructurada de los recursos y procesos ofrece una descripción confiable de la capacidad de producción de las instalaciones. Las estrategias indican cómo los recursos y procesos tienen que ser estructurados y usados para alcanzar los objetivos de la empresa. El modelo de manufactura propuesto por Molina (1999) ha sido probado en estaciones y celdas. La figura 3.12 presenta una pantalla con información del modelo de manufactura.

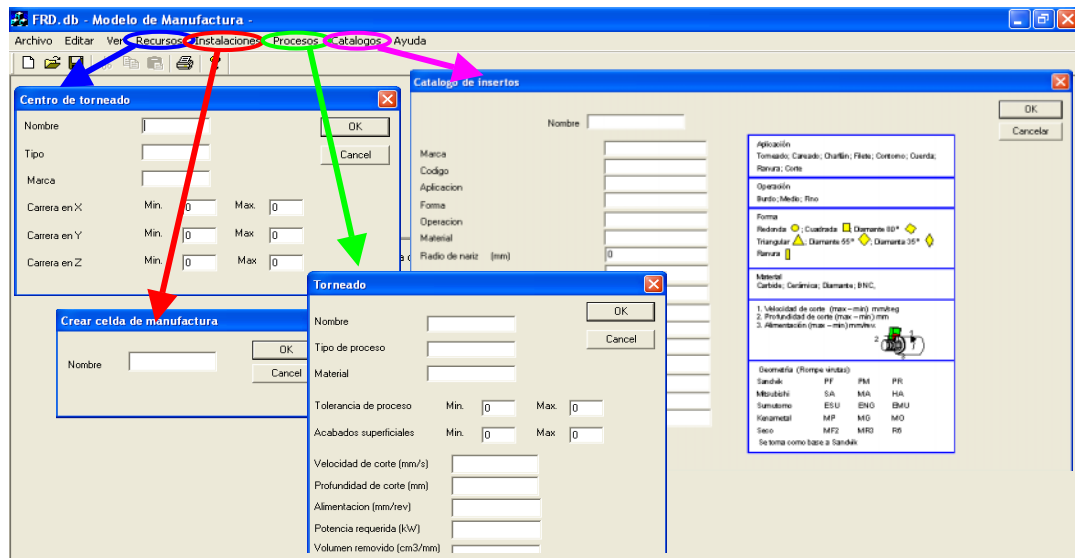


Figura 3.12 Visualización del modelo de manufactura.

## **Capítulo 4**

# **Sistema CAE basado en modelos de información**

En este capítulo se detalla el sistema CAE propuesto para implementar la configuración de maquinaria.

Durante el desarrollo del proceso de configuración de maquinaria mediante el uso de IDEF0, se identificaron tres dominios de información: a) producto, b) datos técnicos y c) manufactura. La información que éstos requieren tener es la siguiente:

- a) El producto requiere una representación del producto que pueda ser usada por diferentes áreas (por ejemplo, la manufactura). La representación debe incluir como mínimo, su especificación, la descripción física del producto y del material de fabricación.
- b) Datos técnicos. Se requiere de una estructura que permita: i) aplicar reglas y prácticas de manufactura a la selección de procesos y recursos, ii) la representación de información comercial de recursos de manufactura.
- c) La representación de los recursos que integran la configuración seleccionada.

Para ello se propone el uso de tres modelos de información (producto, manufactura y catálogos) y una aplicación que interactúe con los tres modelos integrados en un ambiente CAE. La figura 4.2 muestra una relación entre el proceso de configuración de maquinaria y los elementos del sistema CAE así como las metodologías y técnicas que se emplearon en su desarrollo

#### 4.1 Arquitectura del sistema CAE

La arquitectura en la cual se basa el sistema CAE propuesta para apoyar el proceso de configuración de maquinaria se muestra en la figura 4.1. y se refiere a MOSES (MOSES 1997).

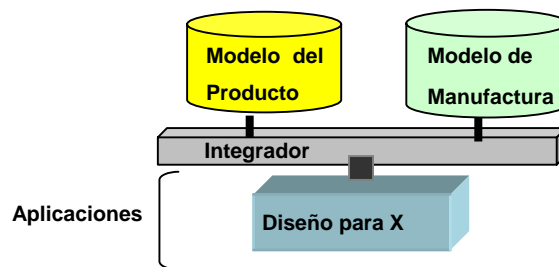
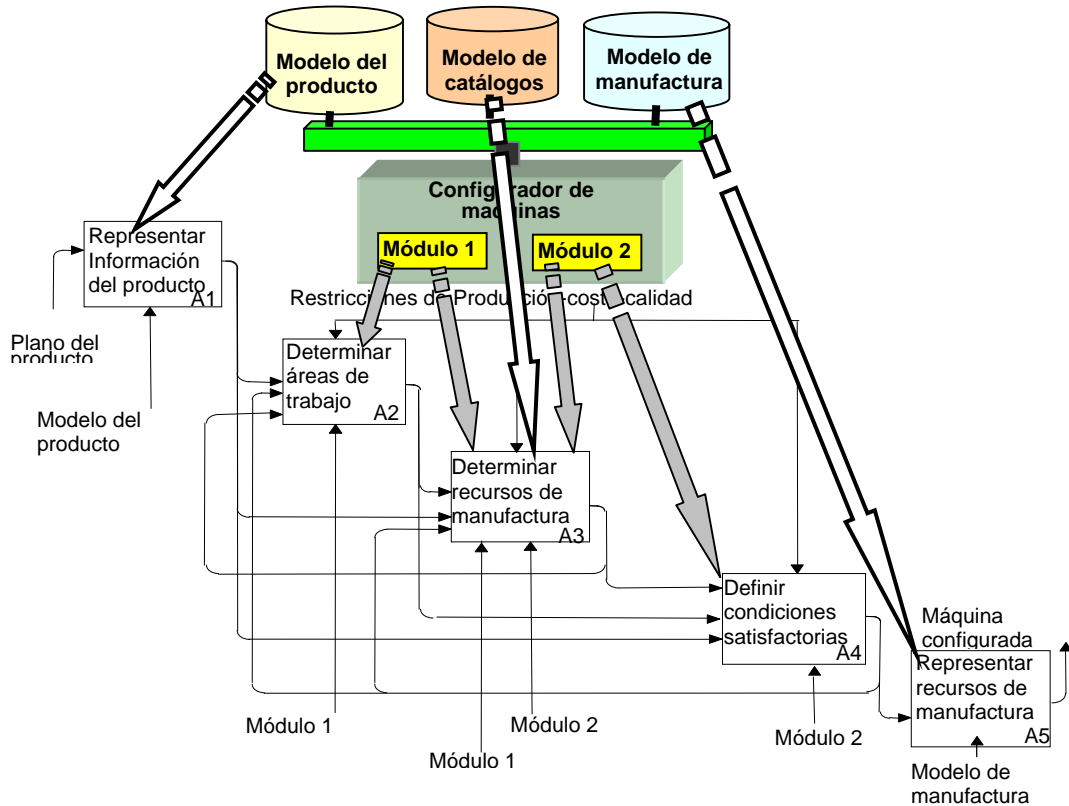


Figura 4.1 Estructura de MOSES.

A la estructura básica de MOSES se le ha incluido un modelo de catálogos, considerando a la información que contendrá como parte de los recursos de manufactura, se decidió que

estuviera ligada al modelo de manufactura por diferentes relaciones, las cuales se explican en la sección 4.5, la arquitectura empleada en la configuración de maquinaria y su relación con el proceso se muestra en la figura 4.2.



Función del proceso	Elemento del sistema CAE	Metodología empleada	Descripción
A1 "Representar Información"	<ul style="list-style-type: none"> <li>Modelo del producto</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>IDEF0</li> <li>Análisis orientado a objetos</li> <li>UML</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sección 4.1</li> </ul>
A2 "Determinar áreas de trabajo"	<ul style="list-style-type: none"> <li>Aplicación (Módulo 1)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>IDEF0</li> <li>Redes neuronales artificiales</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sección 4.4</li> </ul>
A3 "Determinar recursos de manufactura"	<ul style="list-style-type: none"> <li>Aplicación (Módulo 1 y 2)</li> <li>Modelo de catálogos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>IDEF0</li> <li>Redes neuronales artificiales</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sección 4.4</li> <li>Sección 4.3</li> </ul>
A4 "Definir condiciones de operación"	<ul style="list-style-type: none"> <li>Aplicación (Módulo 2)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>IDEF0</li> <li>Algoritmos genéticos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sección 4.4</li> </ul>
A5 "Representar recursos de manufactura"	<ul style="list-style-type: none"> <li>Modelo de manufactura</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>IDEF0</li> <li>Análisis orientado a objetos</li> <li>UML</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sección 4.2</li> </ul>

Figura 4.2 Relación proceso de configuración sistema CAE.

La estructura del sistema está definida por tres modelos: *modelo del producto*, *modelo de manufactura* y *modelo de catálogos*..

Tanto el modelo del producto como el de manufactura y los catálogos están relacionados entre sí, y proporcionan el apoyo necesario para llevar a cabo el proceso de configuración de maquinaria.

El configurador de máquinas (figura 4.2) auxilia al desarrollo de un producto en un dominio particular, en este caso, obedecen a los requerimientos de la configuración de maquinaria e interactúan directamente con los modelos del producto, de manufactura y los catálogos.

### 4.2 El modelo del producto

El modelo del producto es una representación computacional orientada a objetos, por medio de la cual un producto es representado en las etapas de su ciclo de vida. La estructura e información en un modelo del producto dependen de la naturaleza del producto y del proceso de desarrollo del mismo (McKay, 1994). La estructura básica del modelo usada en la configuración de maquinaria está basada en la desarrollada por Borja (1997). La figura 4.3 lo muestra en un diagrama de clases, la cual está enfocado en la descripción física del producto y en las etapas de su ciclo de vida. Se basa en primitivas y se ha probado con partes rotacionales, prismáticas y en el modelado de moldes de inyección de plástico. Con él se realiza la primera función del proceso de configuración.

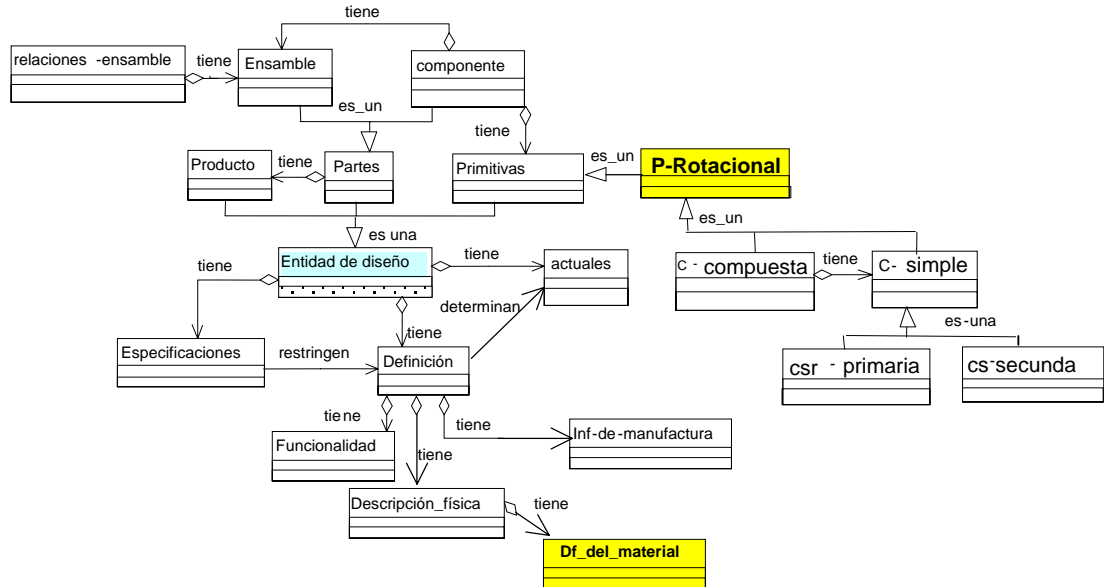


Figura 4.3 Modelo del producto adaptado de Borja (1997)

El núcleo del modelo es la clase *entidad de diseño* la cual se define como, un objeto físico o elemento al cual corresponde una solución desarrollada a través de actividades de diseño enfocadas a satisfacer un conjunto de requerimientos. Por medio de sus subclases, la

entidad de diseño representa la estructura del producto y la información de las etapas del ciclo de vida.

La estructura del producto, representa la organización de sus elementos y cómo éstos están asociados con otros. Se basa en la descomposición de las partes constituyentes, hasta llegar a un punto indivisible organizados jerárquicamente. En el modelo un producto puede ser subdividido en ensambles, subensambles o componentes, y los componentes subdivididos en primitivas.

Un producto en la configuración de maquinaria, son todos aquellos realizados mediante un proceso de arranque de viruta en forma rotacional, simétrica y sobre el eje horizontal.

Una parte puede ser un componente o un ensamble. Se define a un componente como un elemento físicamente indivisible y al ensamble como un conjunto de componentes. Componentes y ensambles están ligados a través de relaciones de ensamble (ver figura 4.4) generados por medio de una o más operaciones de maquinado, los componentes están hechos de primitivas, las cuales son formas básicas unidas entre sí por razones funcionales o de manufactura. Las primitivas son parte de la estructura de un componente y no pueden estar solas.

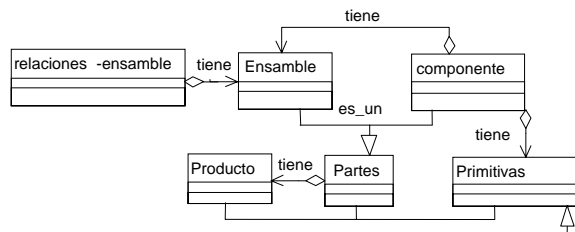


Figura 4.4 Representación del producto

En el nivel más alto de las primitivas se agregaron al modelo original las *rotacionales* (ver figura 4.5). Las primitivas rotacionales propuestas en la configuración de maquinaria son generadas mediante un proceso de arranque de viruta en donde la pieza está rotando, es decir, mediante un proceso de torneado. La introducción es para proponer que tanto el diseño como la manufactura tengan la misma perspectiva de la primitiva, en sí, se está agregando el proceso de fabricación a las primitivas, además de ligar la información del modelo del producto con el de manufactura.

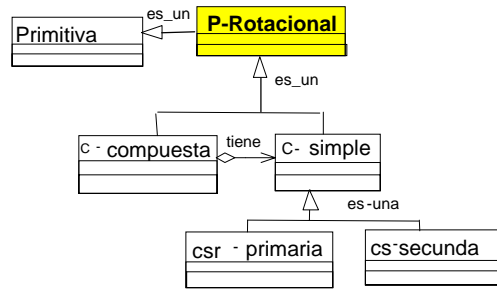


Figura 4.5 Representación de las primitivas.

Las primitivas rotacionales pueden ser *simples* o *compuestas*, la *compuesta* están constituida por una o mas *simples*, la cual se subdivide en *primaria* y *secundaria*. La *primaria* constituye la estructura principal de un componente y puede unirse a otras *primarias*, las *secundarias* se integran a estas para satisfacer una función particular o requerimientos de manufactura.

Etapas del ciclo de vida

El modelo se enfoca a tres etapas del ciclo de vida; cómo fue especificado, cómo fue diseñado y planeado para la manufactura y cómo fue manufacturado. Las tres etapas son modeladas por las clases *especificaciones*, *definiciones* y *actuales* (ver figura 4.6). Una entidad de diseño tiene un conjunto de especificaciones y a cada conjunto de especificaciones le corresponde sólo una entidad de diseño.

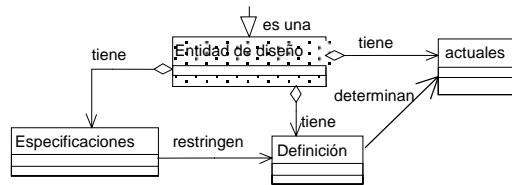


Figura 4.6 Representación de las etapas del ciclo de vida

La asociación “*restringe*” entre las clases *especificación* y *definición*, indican que cada entidad de *definición* debe cumplir con los requerimientos fijados por sus *especificaciones*. Las especificaciones restringen a las *definiciones* y las *definiciones* determinan a los *actuales*.

La clase *especificaciones* describe a un conjunto de características que el diseñador piensa alcanzar en una entidad de diseño, e incluye una descripción general de los requerimientos del cliente y especificaciones de ingeniería.

La clase *definición* describe a una entidad de diseño desde diferentes perspectivas, en este caso se consideran tres que incluye conceptos, características de diseño e información de manufactura y las representa por medio de las clases *funcionalidad*, *descripción física* e *información de manufactura* (ver figura 4.7).

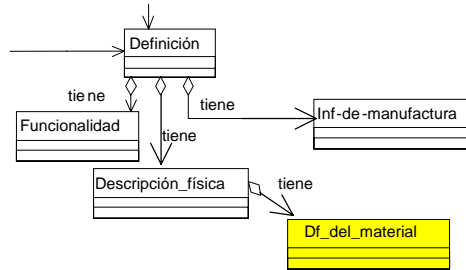


Figura 4.7 La clase definición

La clase *funcionalidad* establece el propósito y los medios que se propone alcanzar.

La clase *descripción física*, representa la geometría, con un punto y un vector que los ubica y orienta en un plano tridimensional de referencia. La geometría es captada por medio de parámetros, los cuales pueden ser cualquier cantidad (dimensión, acabado superficial, etc.). Los parámetros cuentan con dos tipos de reglas las cuales se refieren a operaciones de relación (igual, más grande que, menos grande que) y algebraicas (suma, resta, multiplicación y división), las operaciones pueden definir a cualquier parámetro o entidad de diseño. A la clase descripción se le agregó la subclase descripción física del material (ver figura 4.5), en la cual se incluyen propiedades físicas y mecánicas del material. Esta es información indispensable en el proceso de configuración de maquinaria.

La clase *información de manufactura* tiene intención de proporcionar información tanto al diseñador como al planeador de los procesos y recursos de manufactura. Considerando que la introducción del concepto característica rotacional, la cual incluye intrínsecamente información del proceso y de los recursos manufactura, y cuidando de no repetir información en ambos modelos. Se optó que esta clase sea sólo una liga al modelo de manufactura.

La clase *actual* representa la información de una *entidad manufacturada*, es decir, de una realización física existente. La asociación *determina* entre la *definición* y *actuales* indica que



la definición de una *entidad de diseño* puede ser usada para manufacturar varias entidades actuales, pero a cada una de ellas corresponde sólo a una definición.

### 4.3 El modelo de manufactura

Es usado para definir la información que describe los procesos y recursos de manufactura de una empresa. Captura la información en términos de las instalaciones y capacidades en diferentes niveles de abstracción. La representación estructurada de recursos y procesos permite una descripción confiable de las instalaciones y su capacidad en términos de los procesos y recursos (Molina, 1995). El modelo usado en la configuración de maquinaria está basado en una combinación del modelo propuesto por Molina (1995) y el de Borja (1997), se ha probado en estaciones y celdas de manufactura. La figura 4.8 muestra en un diagrama de clases a la estructura adaptada del modelo de manufactura de Molina. La función 5 del proceso, “representar recursos de manufactura”, se realiza empleando esta estructura.

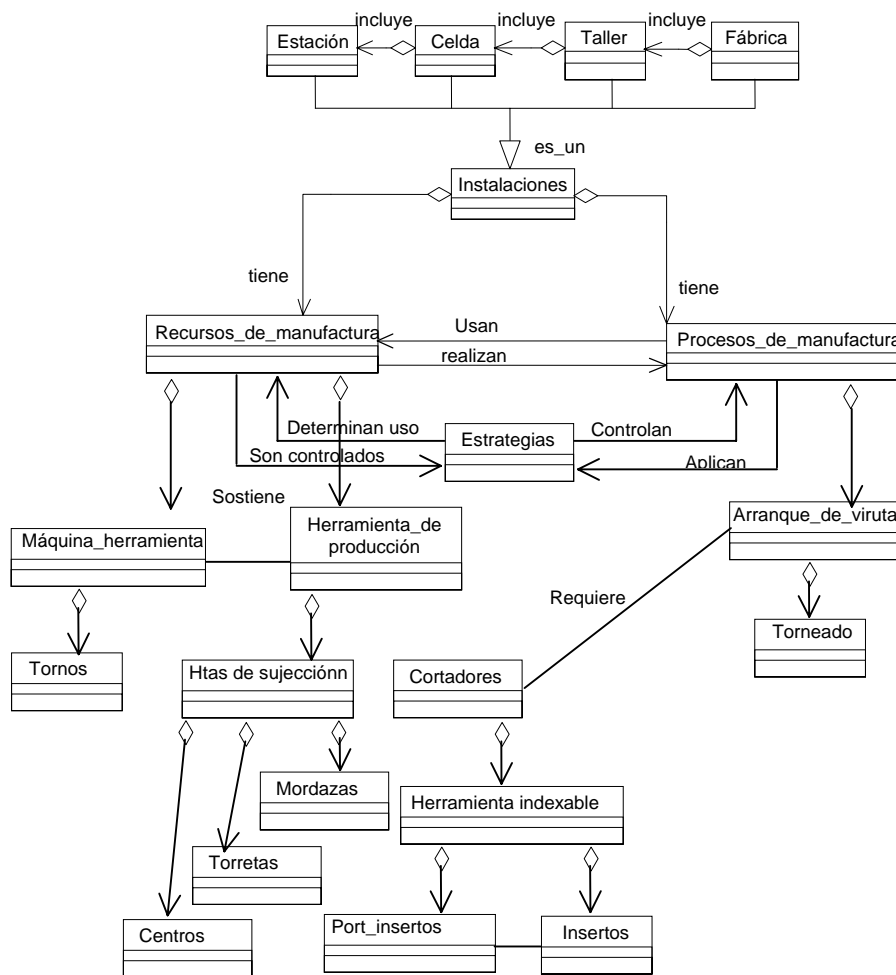


Figura 4.8 Modelo de manufactura adaptado de Molina (1999)

El modelo de manufactura en la configuración de maquinaria está enfocado a capturar los datos de los recursos requeridos, para configurar una máquina herramienta que manufacture una pieza por medio de un proceso de torneado. La estructura del modelo de manufactura tiene como núcleo a las instalaciones, las cuales son definidas (Molina 1999) como cualquier sistema que permita la manufactura de entidades, inicialmente se consideran cuatro tipos de instalaciones, fábrica, taller, celda y estación. Cada entidad de instalación tiene estrategias de manufactura, procesos de manufactura y recursos de manufactura.

Un proceso de manufactura es un procedimiento mediante el cual a) se cambia la geometría de la parte, tolerancias, acabado superficial o propiedades de material de una entidad (proceso de arranque de viruta, de conformado, ensamble, tratamiento térmico); b) se midan sus propiedades (inspección); c) se maneje el producto (operaciones de fijación, transporte, almacenamiento; d) o la combinación de los casos previos (Borja 1997).

Los procesos de manufactura (ver figura 4.9) tienen procesos de arranque de viruta y éstos, a su vez, tienen procesos de torneado. El proceso de torneado es simétrico, rotacional, y sobre el eje de giro de la pieza. La capacidad del proceso de manufactura está definida por la capacidad de las herramientas de producción para alcanzar las especificaciones de dicho proceso.

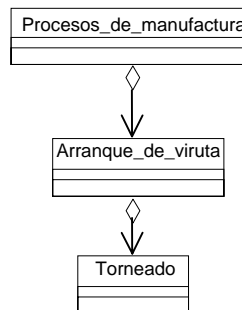


Figura 4.9 La clase procesos de manufactura

Un recurso de manufactura es cualquier elemento físico existente en una instalación de manufactura capaz de manufacturar un producto, por ejemplo la maquinaria y herramientas de producción, los medios de transporte, suministro y almacenamiento.

De la clase recursos de manufactura se desprenden dos subclases, máquina herramienta y herramientas de producción (ver figura 4.10).

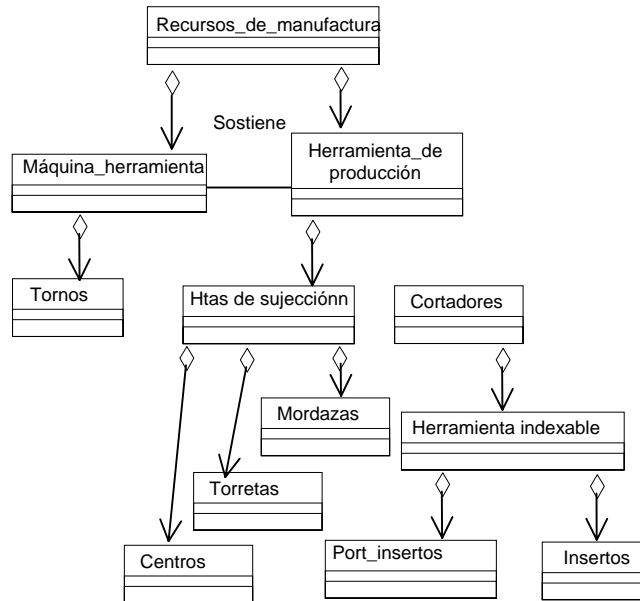


Figura 4.10 La clase recursos de manufactura.

La máquina herramienta sostiene una herramienta de producción. En la configuración de maquinaria sólo se han considerado a los tornos dentro de la clase máquinas. Las herramientas de producción tienen dos subclases, la primera herramientas de sujección, que está constituidas por *mordazas*, *torretas* y *puntos de centro*, la segunda son los cortadores, que son indexables y dentro de ellos están los porta insertos e insertos.

En el sentido de que puede requerirse de diferentes tipos de máquina y cortadores para realizar uno o diferentes procesos, es necesario asociar los cortadores con los procesos y con las máquinas.

Las estrategias en la configuración de maquinaria están enfocadas a determinar los recursos de manufactura requeridos, y las condiciones a las que éstos tienen que operar para cumplir con los objetivos de la empresa. Se han considerado dos tipos de estrategias: de producción y selección. Las estrategias de selección están contenidas en la aplicación y se implementan por medio de patrones de entrenamiento de redes neuronales. Las estrategias de producción se dan a nivel estación y definen las condiciones a las ella que tiene que operar, puede ser máxima producción, mínimo tiempo de producción o la máxima calidad deseada, no son implementadas, pero se proporcionan elementos que conduzcan a tomar la mejor elección.

#### 4.4 El modelo de catálogos

El modelo de catálogos (Catal) es una importante contribución del autor al modelado de la información en sistemas de manufactura. Almacena información comercial de los recursos de manufactura proporcionada por fabricantes.

Se han considerado tres grupos de catálogos: herramientas de corte, de máquinas herramientas y de elementos de sujeción. Dentro de estos tres grupos, están los elementos principales para manufacturar una pieza relacionados entre sí. La máquina usa elementos de sujeción para sujetar al material de trabajo y al cuerpo de la herramienta de corte, se le ha llamado cuerpo de herramienta a un inserto de corte y al elemento que lo sujeta. Estos dos elementos son parte de las herramientas de corte. Un cuerpo de herramienta se incorpora a la máquina por medio de una torreta o un magazine, que son cargados por la máquina. La figura 4.11 muestra la relación entre recursos de catálogos.

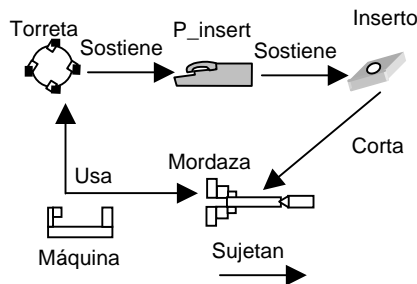


Figura 4.11 Relaciones entre recursos de catálogos

##### 4.4.1 El catalogo de herramientas de corte

Actualmente toda herramienta moderna tiene insertos. En el modelo de catálogos se considera que el cuerpo de una herramienta está constituido por un inserto y su porta inserto (ver figura 4.12), de acuerdo a su funcionalidad existen diferentes tipos de ambos. Se han considerado dos clases, una con información del inserto y otra con la del porta inserto.

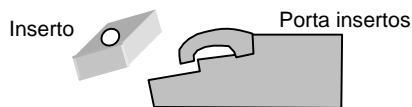



Figura 4.12 Constitución de una herramienta de corte

#### 4.4.2 Catálogo de insertos.

La selección del inserto es muy importante para alcanzar la calidad deseada en un producto. La información que se obtenga de éstos a través de los catálogos, es requerida principalmente, para determinar datos necesarios en el maquinado de un producto. La base de datos del inserto cubre ocho características con los siguientes atributos (ver figura 4.13):

1. Aplicación. Se consideran las aplicaciones de torneado (corte externo o interno longitudinal), careado, trozado, contorno.
2. Forma. Se refiere a la forma geométrica del inserto que puede ser redondo, cuadrado rómbico 80°, rómbico 55°, rómbico 35°, triangular, de ranura; las cuales son las más usadas industrialmente.
3. Operación. Se consideran principalmente tres tipos de operaciones: fino, medio y burdo.
4. Material. El material de un inserto está directamente relacionado con el tipo de corte, el material de la pieza de trabajo y el acabado superficial que se desea obtener.
5. Condiciones de operación. Se incluyen tres parámetros: velocidad de corte, profundidad de corte y alimentación.
6. Radio de nariz. Es parte de la geometría del inserto y el elemento principal para el cálculo de la información requerida en la configuración de maquinaria.
7. Código. Se considera la codificación de los insertos según los estándares ISO.
8. Costo. Se refiere al costo del inserto determinado en noviembre de 2005

<b>Aplicación</b> Torneado; Careado; Chaflán; Filete; Contorno; Cuerda; Ranura; Corte
<b>Operación</b> Burdo; Medio; Fino
<b>Forma</b> Redonda  ; Cuadrada  ; Diamante 80°  ; Triangular  ; Diamante 55°  ; Diamanta 35°  ; Ranura 
<b>Material</b> Carbide; Cerámica; Diamante; BNC,
<b>Condiciones de operación</b> 1. Velocidad de corte (max – min) mm/seg 2. Profundidad de corte (max – min) mm 3. Alimentación (max – min) mm/rev.

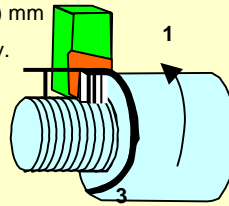


Figura 4.13 Atributos del catálogo de insertos

#### 4.4.3 El catálogo de porta insertos

Para manufacturar una pieza se requiere orientar la herramienta de corte con respecto a la pieza de trabajo en una o varias posiciones específicas, tal orientación la da el porta herramientas. Se han considerado solamente aquellos porta insertos empleados en las operaciones de torneado. Considerándose seis características con los siguientes atributos (ver figura 4.14):

- Tipo. Se tienen tres tipos para los coloquialmente llamados cortes de mano derecho, izquierdo y el neutral.
- Operación. En la configuración de maquinaria se han considerado dos operaciones fundamentales para los porta insertos, las cuales son: para el corte longitudinal externo e interno y ranurado.
- Dirección, puede ser al frente y reversa.
- Ángulos. Se consideran principalmente al ángulo de inclinación y el de corte.
- Geometría. Se considera la longitud y el ancho del porta inserto.

- Costo. Es el determinado en noviembre de 2005.
- Código. Se adopta el definido en el estándar ISO

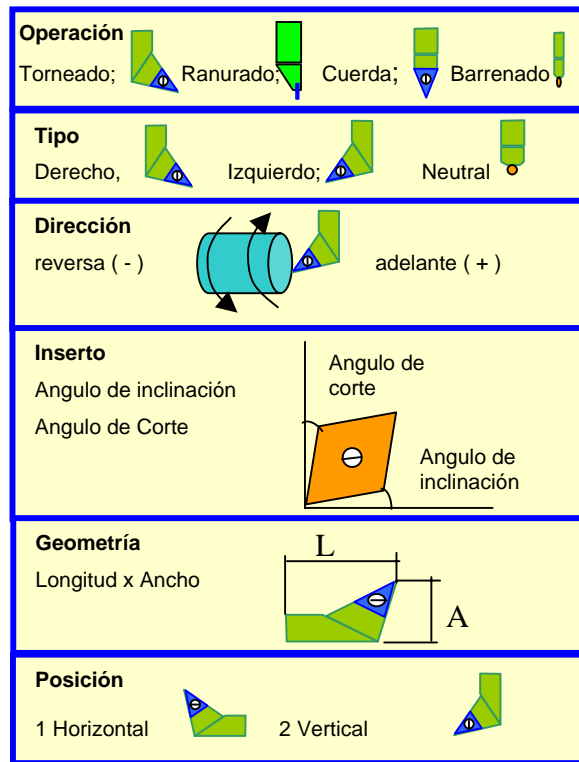


Figura 4.14. Atributos del porta insertos.

**4.4.4 El catálogo de máquinas.**

La máquina herramienta es el elemento que manufacturará la pieza diseñada. La configuración de maquinaria consideró dos factores en la construcción del catálogo de máquinas. En él se incluyen principalmente máquinas de control numérico con un mínimo de tres ejes, y factores referentes a su capacidad de operación. El catálogo de máquinas herramientas captura información sobre:

- Tipo de máquina. Se refiere al número de ejes de la máquina.
- Eficiencia. Se expresa en porcentaje
- Precisión. Se refiere a la precisión máxima que puede entregar la máquina.
- Dimensiones de trabajo. Son las dimensiones máximas a las que puede trabajar.
- Costo. Es el determinado en noviembre de 2005.

#### 4.4.5 El catálogo de elementos de sujeción.

El catálogo de elementos de sujeción contiene la información de los elementos encargados de sujetar, tanto a la pieza de trabajo, como a la herramienta de corte.

Se han considerado dos elementos para la sujeción al material de trabajo, la mordaza y los puntos de centros, con los siguientes atributos:

- Tipo. Puede ser de dos tipos, sujeción externa o interna
- Dimensiones. Se refiere al diámetro de apertura.
- Fuerza de sujeción. La fuerza máxima que puede ejercer sobre el material de trabajo.

El cuerpo de la herramienta de corte es sujetado por una torreta o un magazine, para los cuales se ha considerado como atributo principal al número de herramientas que estas pueden sostener

#### 4.4.6 Estructura del modelo de catálogos

La clase *catálogos* (ver figuras 4.15 y 4.16) tiene tres subclases, las cuales representan tres grupos de catálogos que son: de herramientas de corte, de máquinas herramientas, y de elementos de sujeción.

La clase *herramientas de corte* tiene las clases *insertos* y *porta insertos*, las cuales están asociadas entre sí. Un porta inserto puede sostener a uno o muchos tipos de insertos.

La clase *elementos de sujeción* tiene *cargador de herramientas*, *mordazas* y *puntos de centro*. El cargador de herramientas está relacionadas con el porta insertos y tiene *torretas* y *magazines*, lo que significa que un porta inserto puede ser sostenido por una torreta o un magazine.

La clase *máquina herramienta* está asociada con la *herramienta de sujeción*, esto es, una máquina herramienta necesita usar una mordaza, una torreta o un magazine, un porta herramienta y un inserto, entre otros recursos de manufactura.



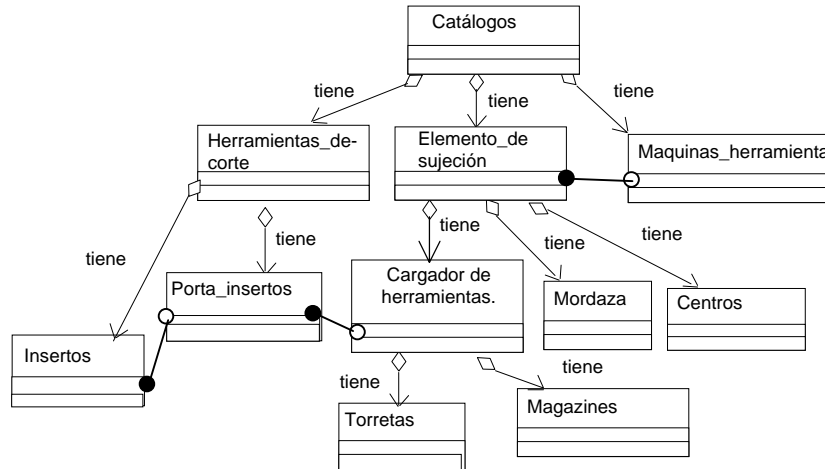


Figura 4.15 Estructura del modelo de catálogos.

#### 4.5 Relaciones entre modelos

Los modelos del producto, de manufactura y de catálogos, están ligados entre sí por medio de relaciones (ver figura 4.16). En la figura se muestran las relaciones a un nivel más alto para que las subclases hereden la relación.

El modelo del producto y el de manufactura están ligados por las clases “*primitivas*” e “*información de manufactura*” del modelo del producto y por la clase *procesos de manufactura* del modelo de manufactura, las relaciones quedan de la siguiente manera: “*primitivas tienen proceso de manufactura*”, “*el proceso de manufactura genera primitivas*”, “*Inf. de manufactura tiene procesos*”, “*procesos es una inf. de manufactura*”.

El modelo de catálogos está ligado al de manufactura por medio de las clases “*recursos de manufactura*” y “*catálogos*”, “*los recursos tienen catálogos*”, “*catálogos son recursos*”.

Con el modelo de catálogos y el de manufactura es posible representar a los recursos actuales disponibles en una instalación específica y aquellos que se ofrecen en el mercado para manufacturar una pieza en particular.

El modelo de catálogos por medio de la información actualizada de los proveedores es una valiosa herramienta con la cual se pueden complementar los recursos disponibles en una instalación.

Durante el proceso de configuración de maquinaria, el modelo de catálogos es empleado para ejecutar la función A3, “*determinar recursos de manufactura*”.

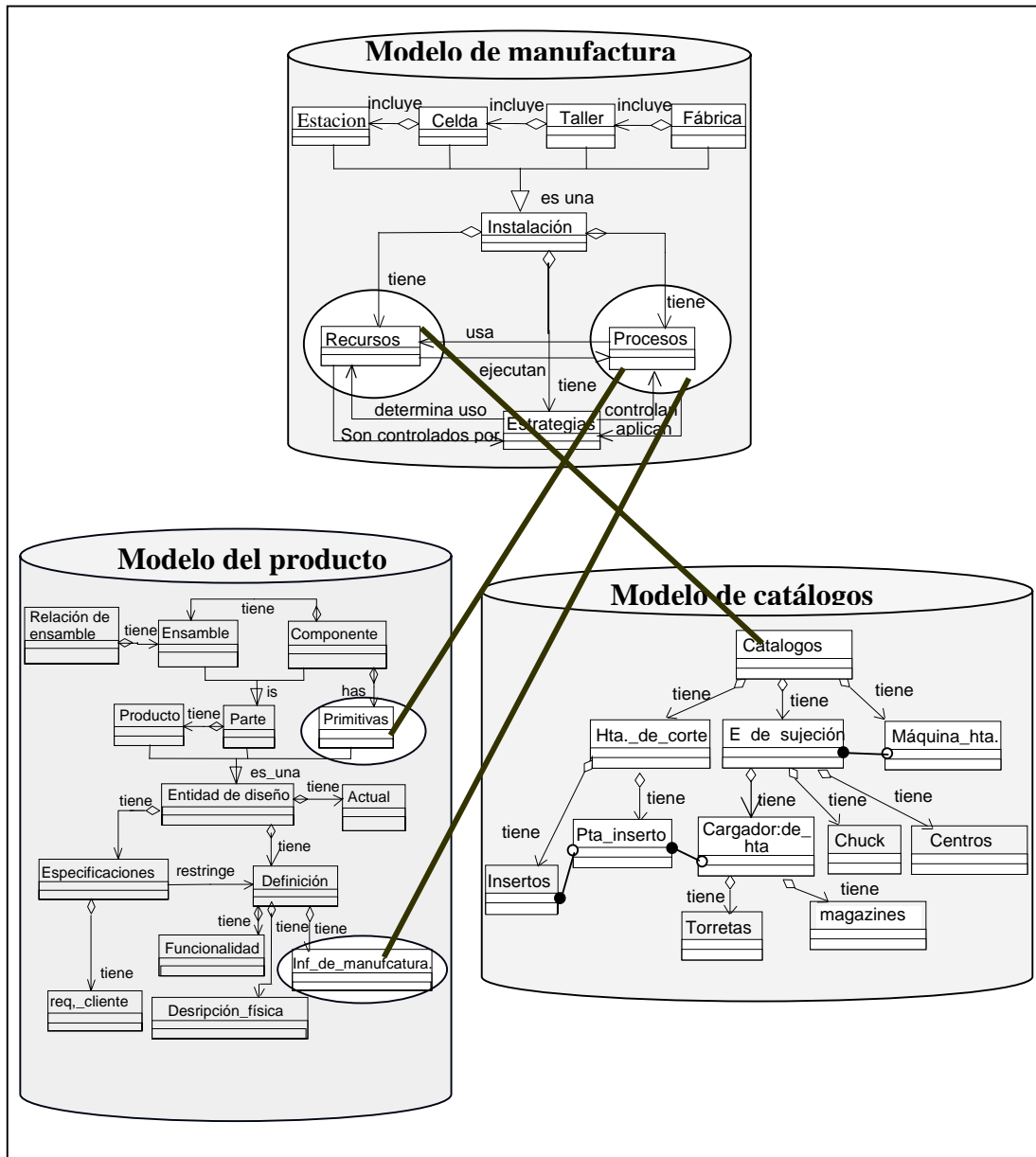


Figura 4.16 Relación entre modelos

**4.6 La aplicación computacional**

La aplicación computacional auxilia el desarrollo de productos por medio de la generación de información útil en la planeación del proceso de manufactura.

La aplicación considera los requerimientos de la configuración de maquinaria e interactúa directamente con los modelos del producto, manufactura y catálogos para especificar la configuración de una máquina herramienta, seleccionando los procesos, recursos y condiciones de operación, que permitan alcanzar el mejor compromiso entre la producción, el costo y la calidad. La aplicación se organiza en dos módulos.

El Módulo 1 interactúa con el modelo del producto. Propone condiciones de operación y determina procesos y recursos por medio de un grupo de redes neuronales del tipo *backpropagation*. Son un total de cuatro redes (ver figura 4.17) que forman sus vectores de entrada con información del modelo del producto, las que son ejecutadas y proporcionan información básica para configuración de maquinaria.

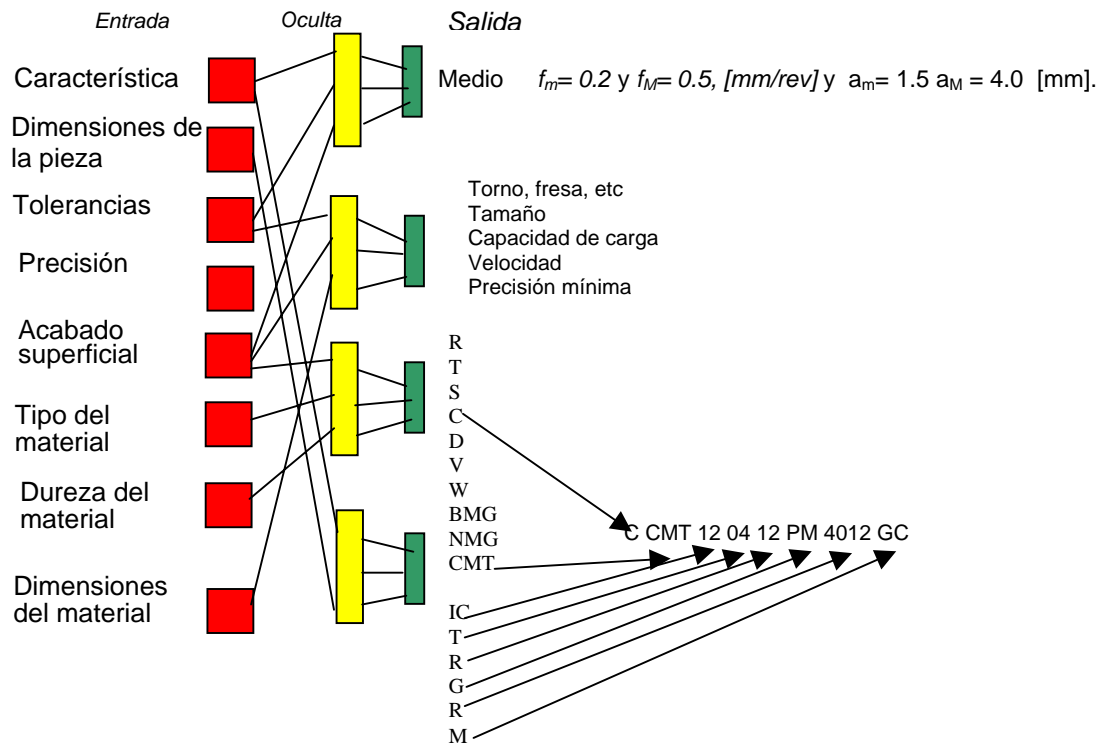


Figure 4.17 Grupo de redes neuronales

Las redes están programadas en C++, y las tablas 4.1 a 4.4 muestran su arquitectura.

	Entrada	Oculto	Salida
Neuronas	7	6	8
Patrones de entrenamiento	78		
No de iteraciones	500		
Factor de aprendizaje	0.42		
Momento	0.68		
Error	0.001		

Tabla 4.1 Arquitectura de la red para condiciones de operación

	Entrada	Oculto	Salida
Neuronas	8	3	6
Patrones de entrenamiento	53		
No de iteraciones	500		
Factor de aprendizaje	0.385		
Momento	0.76		
Error	0.001		

Tabla 4.2 Arquitectura de la red para determina la máquina herramienta

	Entrada	Oculto	Salida
Neuronas	6	6	10
Patrones de entrenamiento	160		
No de iteraciones	500		
Factor de aprendizaje	0.42		
Momento	0.7		
Error	0.001		

Tabla 4.3 Arquitectura 1 de la red para determinar el inserto

	Entrada	Oculto	Salida
Neuronas	8	4	8
Patrones de entrenamiento	85		
No de iteraciones	500		
Factor de aprendizaje	0.3		
Momento	0.69		
Error	0.001		

Tabla 4.4 Arquitectura 2 de la red para determinar el Inserto

Los vectores de entrada son generados mediante el siguiente procedimiento.

- Se abre la base de datos del modelo del producto.
- Se establece una transacción entre la base de datos y las redes.
- Se definen o crean raíces dentro de la base para buscar la información.
- Se buscan las raíces dentro de la base.
- Se obtienen los valores deseados.
- Se asignan los valores a las entradas de las redes.
- Se cierra la base de datos.
- Se ejecutan las redes neuronales.

La información definida por las redes es almacenada en un archivo temporal (reddat.dat), una vez almacenada la información, el mismo programa de las redes ejecuta los algoritmos de búsqueda mostrados en el capítulo 3.

Los algoritmos leen el archivo reddat.dat y mediante el siguiente procedimiento buscan los recursos definidos por las redes.

- Leer datos del archivo dat.
- Abren la base de datos del modelo de catálogos.
- Se establece una transacción entre la base de datos y el algoritmo.
- Se definen o crean raíces dentro de la base para buscar la información.
- Se buscan las raíces dentro de la base.
- Se obtienen los valores deseados.
- Se asignan los valores a las entradas algoritmo.
- Se cierra la base de datos.
- Se inician cálculos complementarios.
- Se verifican la compatibilidad de los recursos.
- Se inicia la optimización.

Actualmente se han definido diferentes enfoques para optimación de un maquinado, se pueden clasificar en aquellos que buscan un óptimo local como los usados y los que buscan un optimo global como el buscada en esta investigación, los cuales usan algoritmos genéticos.

En la configuración de maquinaria se decidió usar el algoritmo NSGA II (*non-dominated sorting genetic algorithm*) para optimizar. La presencia de una optimización de múltiples criterios, requerida en la configuración de maquinaria, requiere un conjunto de soluciones óptimas (conocidas como soluciones optimas de Pareto) en lugar de una solución óptima simple. En ausencia de mayor información, no se puede decir que una de las soluciones óptimas de Pareto es mejor que otra. Esto demanda encontrar la mayor cantidad de soluciones óptimas de Pareto posibles. El algoritmo NSGA II tiene la capacidad de encontrar múltiples soluciones en una sola corrida. Se ha comprobado (Deb 2002) que NSGA II supera a otros algoritmos para la optimización de múltiples criterios, por su baja complejidad computacional y su propiedad de elitismo (Zitzler *et al* 2000 y Deb *et al* 2001). NSGA II posee tres características importantes que han probado dar buenos resultados: i) uso del principio de elitismo, ii) emplea un mecanismo para preservar la diversidad, y iii) enfatiza las soluciones no nominadas en una población. La descripción del algoritmo se muestra en el apéndice A. El algoritmo NSGA empleado en la configuración de maquinaria ha sido comparado contra diversos algoritmos, ha mostrado ventajas en diferentes pruebas que se realizan para comprobar la efectividad, así como también tiene desventajas. Además de la efectividad computacional que ha mostrado, otro motivo por su aplicación en esta investigación, es su uso a nivel industrial. Ha sido aplicado en la medicina, en el diseño mecánico, automotriz, en la industria petrolera entre otras. Con lo que demuestra su efectividad en casos prácticos, a diferencia de otros algoritmos que tienen menor aplicación industrial como SPEA y otros que solo tiene aplicación académica. La estructura del algoritmo empleado y una gráfica de las funciones se muestra en la figura 4.19

Parámetros del algoritmo genético	
Tamaño de la población	10
No. de generaciones	200
Probabilidad de cruza	0.9
Número de cruza	1763
Probabilidad de mutación	0.20
Número de mutaciones	8000
La estrategia de selección	Torneo
Número de funciones objetivo	3
Número de restricciones	3
Número de variables	4

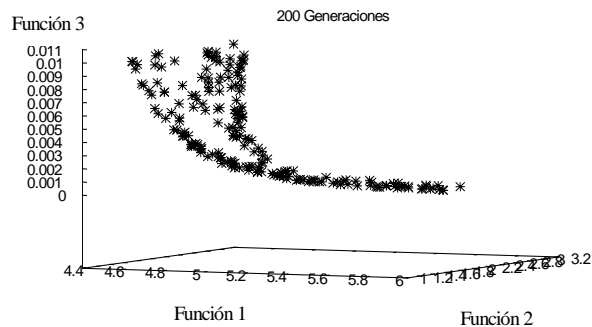


Figura 4.19 Parámetros de la algoritmo y su convergencia a 200 generaciones

# Capítulo 5

## Diseño de las bases de datos

El objetivo de este capítulo es explicar las estructuras implementadas por los modelos del producto, de manufactura, el de catálogos y cómo proporcionan un importante apoyo a las actividades del proceso de planeación de manufactura.

Se pretende con las estructuras definidas lo siguiente:

- Mostrar que la estructura de los modelos presentados es efectiva para almacenar la información requerida en la configuración de maquinaria.
- Mostrar que la información capturada en los tres modelos es la requerida para configurar máquinas herramientas.

### **5.1 Estructura del modelo del producto**

Se usó la estructura presentada en la sección 4.1. Para construir la base de datos del modelo del producto, se creó un diagrama de clases en Object Design, el cual es un asistente para crear el código en Visual C++ de las clases de la base de datos con sus respectivos atributos. El diagrama creado se muestra la figura 5.1





### 5.2 Estructura del modelo de manufactura

La estructura usada en la configuración de maquinaria, es la misma que se definió para el modelo de manufactura y que se explicó en la sección 4.2. El diagrama de clases usado en este modelo se desarrolló empleando la aplicación de Object Design y se muestra en la figura 5.2.

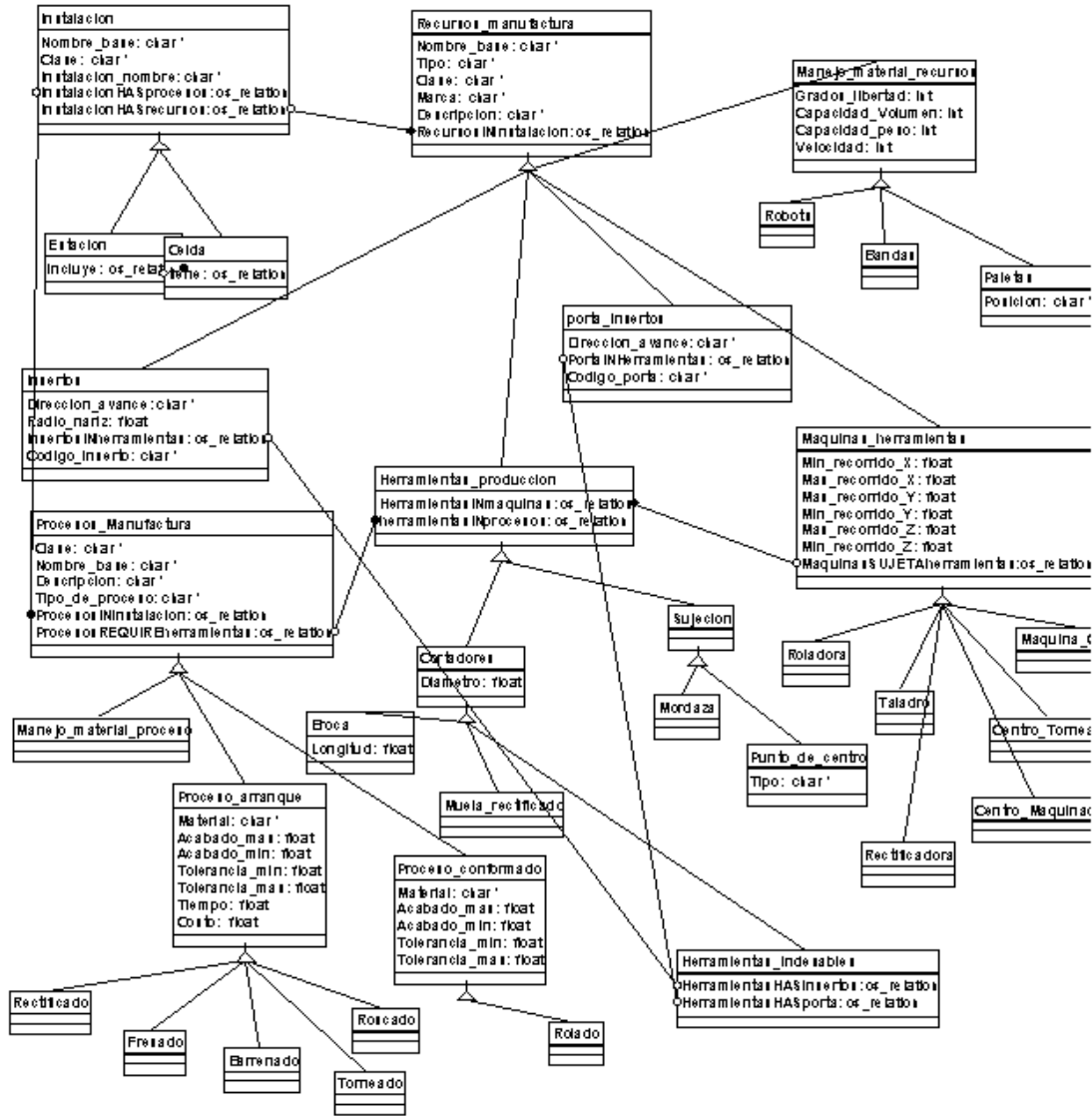


Figura 5.2 Estructura definida para la implementación del modelo de manufactura

Esta estructura permite captar la información derivada de una configuración de maquinaria, la cual tiene que ver en específico con un proceso de torneado. Se incluye información del proceso, de recursos de manufactura entre los que se encuentran la máquina herramienta, los cortadores y elementos de sujeción.

### 5.3 Estructura del modelo de catálogos

La estructura usada para el modelo de catálogos se explicó en la sección 4.4. Para construir la base de datos de los catálogos, se usó un diagrama de clases desarrollado en Object Design. El diagrama se muestra en la figura 5.3

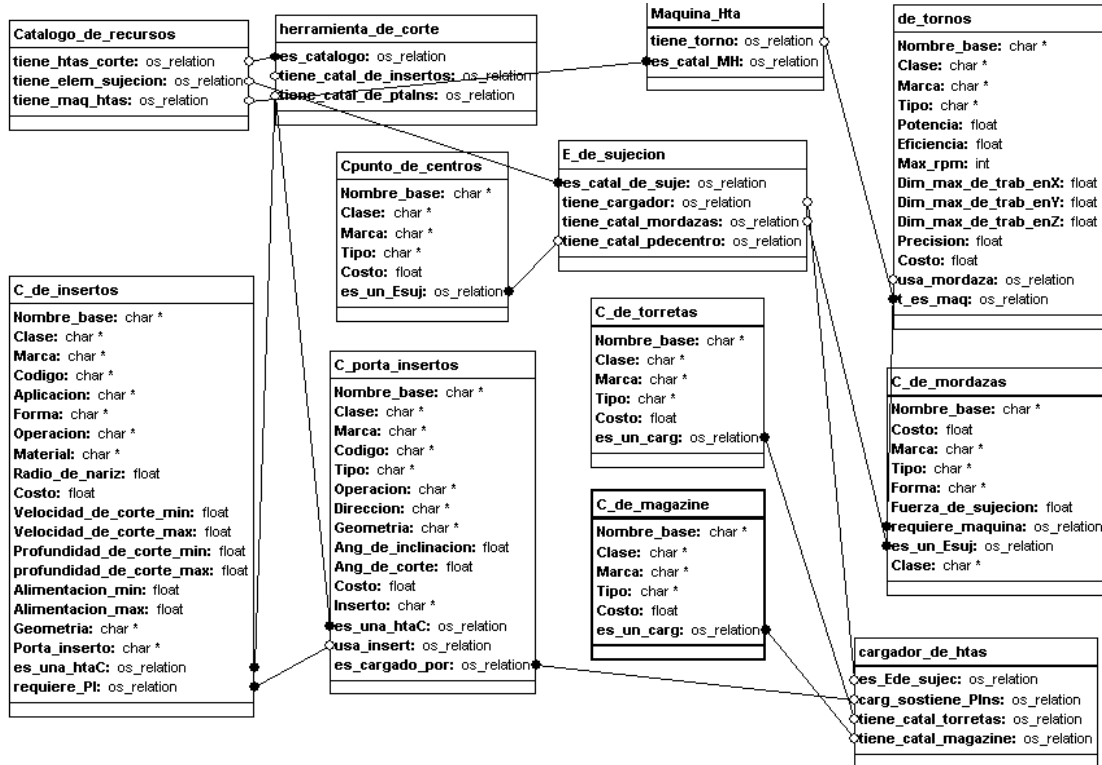


Figura 5.3 Estructura definida para la implementación del modelo de catálogos

Ésta estructura permite captar la información proporcionada por fabricantes de insertos, porta insertos, máquinas herramientas (torno), mordazas, torretas. Estos catálogos se consideraron esenciales para el proceso de configuración de maquinaria, puesto que constituyen los recursos de manufactura que integran una configuración de maquinaria.

## **Capítulo 6**

# **Aplicación del sistema CAE a un caso de estudio**

En este capítulo se muestra el funcionamiento de la configuración de maquinaria al determinar configura el equipo para un caso práctico, el cual se muestra en la figura 6.

### 6.1 Descripción del producto

El producto que se empleó para probar el software tiene las siguientes características.

- Es un componente cilíndrico el cual no contiene características prismáticas.
- Es un componente mecánico constituido de un sólo material.
- Es producido por medio de un proceso de torneado.
- Se tiene disponible su información de diseño y manufactura.
- Se requieren 400 piezas por turno..
- Se consideran turnos de trabajo de 8 horas.
- No existe instalación alguna de manufactura.

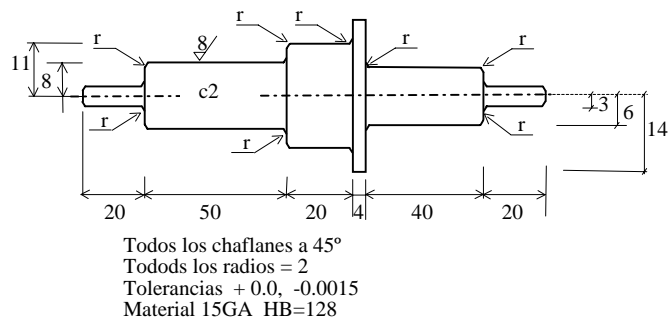


Figura 6.1 Producto (Flecha)

## 6.2 Descripción del software

La pantalla principal se muestra en la figura 6.2 y está constituida por tres etapas principales.

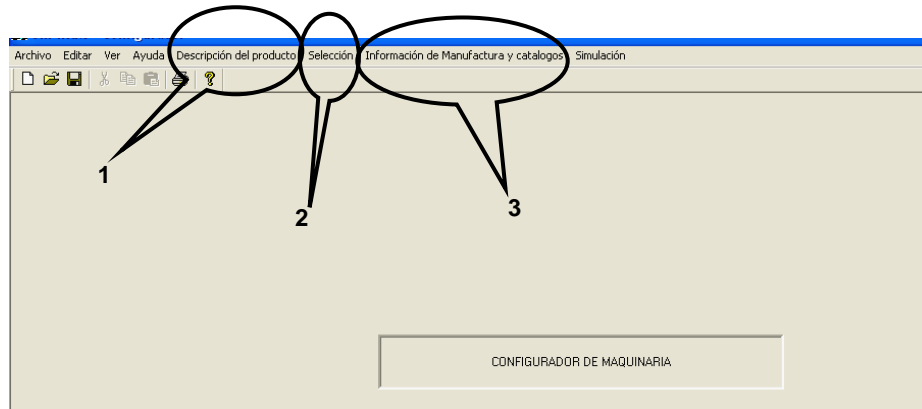


Figura 6.2. Pantalla principal de la aplicación para configurar maquinas.

1. Descripción del producto, la cual ejecuta al modelo del producto.
  2. Selección.
  3. Información de manufactura y catálogos.
- La descripción del producto. Ejecuta al *modelo del producto*, en él se especifica la información requerida para configurar una máquina.
  - La selección. Ejecuta dos programas: el primero para la selección de recursos de manufactura necesarios para manufacturar la pieza especificada en la descripción del producto, el segundo para determinar a los recursos de manufactura que ofrezcan las mejores condiciones de operación.
  - La información de manufactura y catálogos. Ejecuta a los modelos de manufactura y catálogos simultáneamente, esto considerando que toda la información de manufactura se encuentra en el modelo de manufactura y que los catálogos son recursos de manufactura.

## 6.3 Introducción de información en el modelo del producto

El modelo del producto contiene la información requerida en el proceso de configuración de maquinaria, la cual tiene que ver principalmente, con la descripción física del producto y del material. La pantalla principal de este modelo se muestra en figura 6.3.

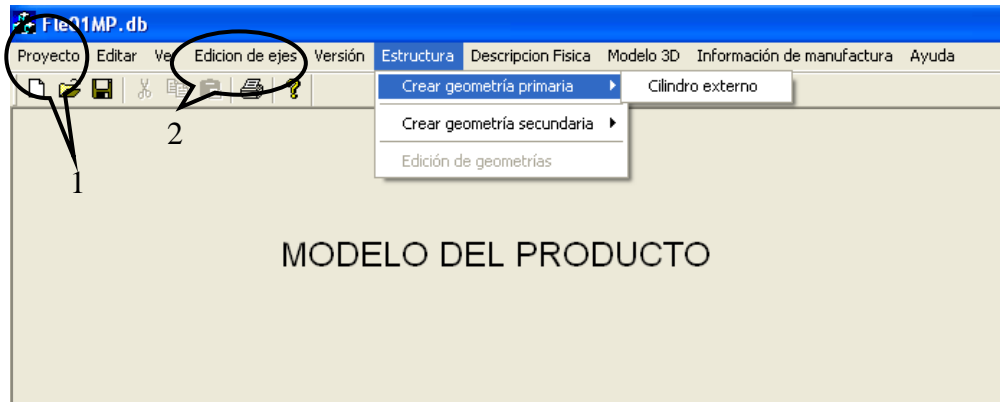


Figura 6.3. Pantalla principal del modelo del producto

Lo primero es crear un proyecto con la base de datos que almacenará la información del producto requerido, después con la edición de ejes se especifica el nombre del producto y la versión de la base de datos, lo anterior se hace en los puntos 1 y 2 de la figura 6.3.

La definición de la estructura del producto, es quizás la información mas importante para la configuración de maquinaria, se realiza por medio de una librería de primitivas, ver figura 6.4.

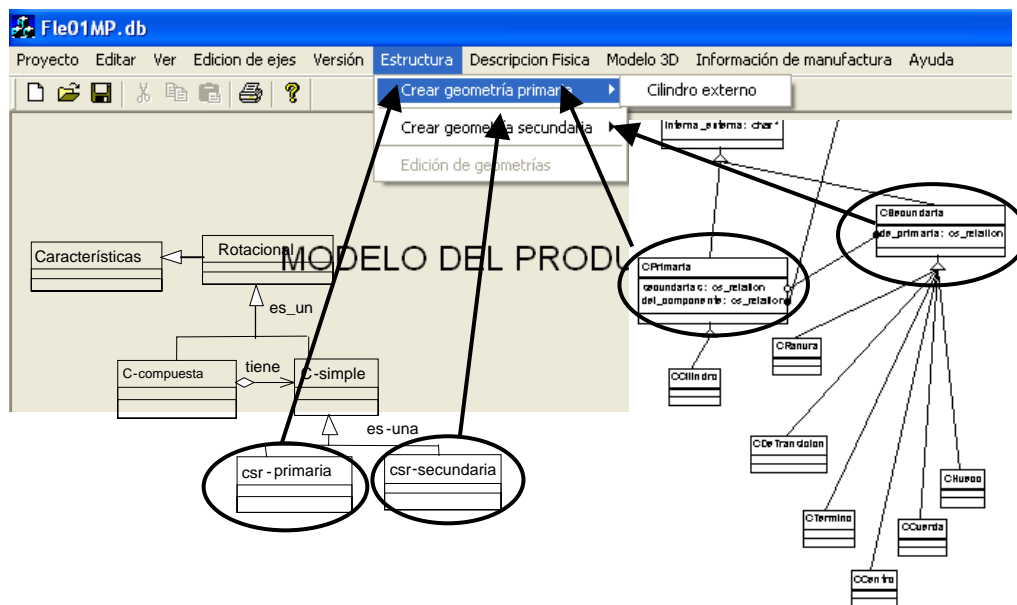


Figura 6.4. Información de la estructura del producto en el modelo.

La figura muestra las dos clases de primitivas (primarias y secundarias) existentes en la estructura del modelo.

Al momento de seleccionar una primitiva el programa le asigna un nombre, compuesto por el nombre del componente el sufijo *F*, para las primitivas primarias y una *f* para las secundarias, un número secuencial. Por ejemplo, la primitiva Eje1MP\_F0, indica que es el componente primario 0 del producto Eje1MP. La estructura de la pieza se inicia por el lado izquierdo.

Cuando se crea una primitiva secundaria, ya sea de transición o terminal, el programa la asocia a una primitiva primaria agregando el sufijo *f*, por ejemplo Eje1MP\_F0\_f0 indica que la característica de transición ó terminal 0 se le ha asignado a la primitiva primario 0 del componente Eje1MP, ver figura 6.5.

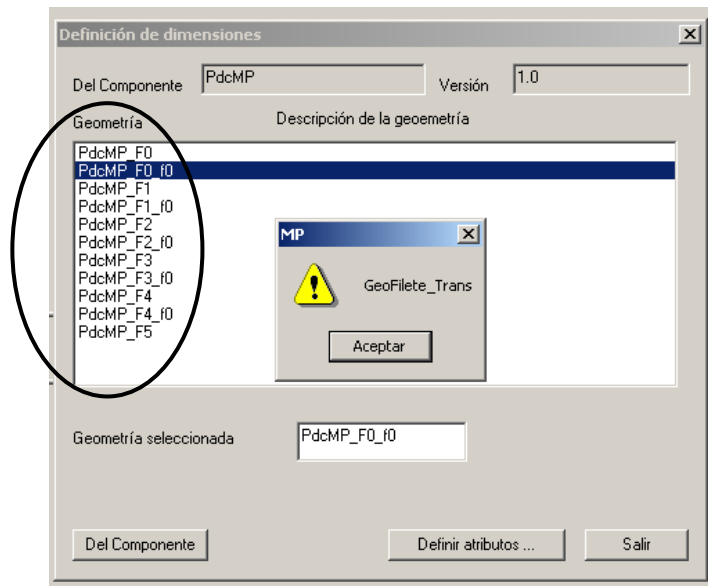


Figura 6.5. Identificación de una característica primaria.

Hasta esta parte solo se han definido las primitivas que integran a un componente, el siguiente paso es describir físicamente a cada una de estas. En el menú principal, en la descripción física se tienen dos opciones, definir dimensiones y descripción del material, ver figura 6.6.



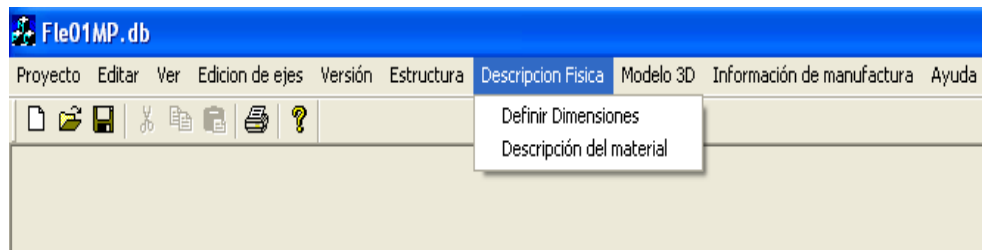


Figura 6.6 Descripción física

Al seleccionar *definir dimensiones*, el programa muestra una lista con todas las primitivas en la estructura del producto, cuando una de ellas es seleccionada, se confirma el tipo de característica ver figura 6.5 y a continuación se presenta una pantalla con los atributos correspondientes a la primitiva seleccionada ver figuras 6.7, en la cual se muestra la relación entre la información mostrada en la pantalla y la estructura del modelo del producto, corresponde a una primitiva cilíndrica. La operación se repite para cada primitiva definida en la estructura del producto.

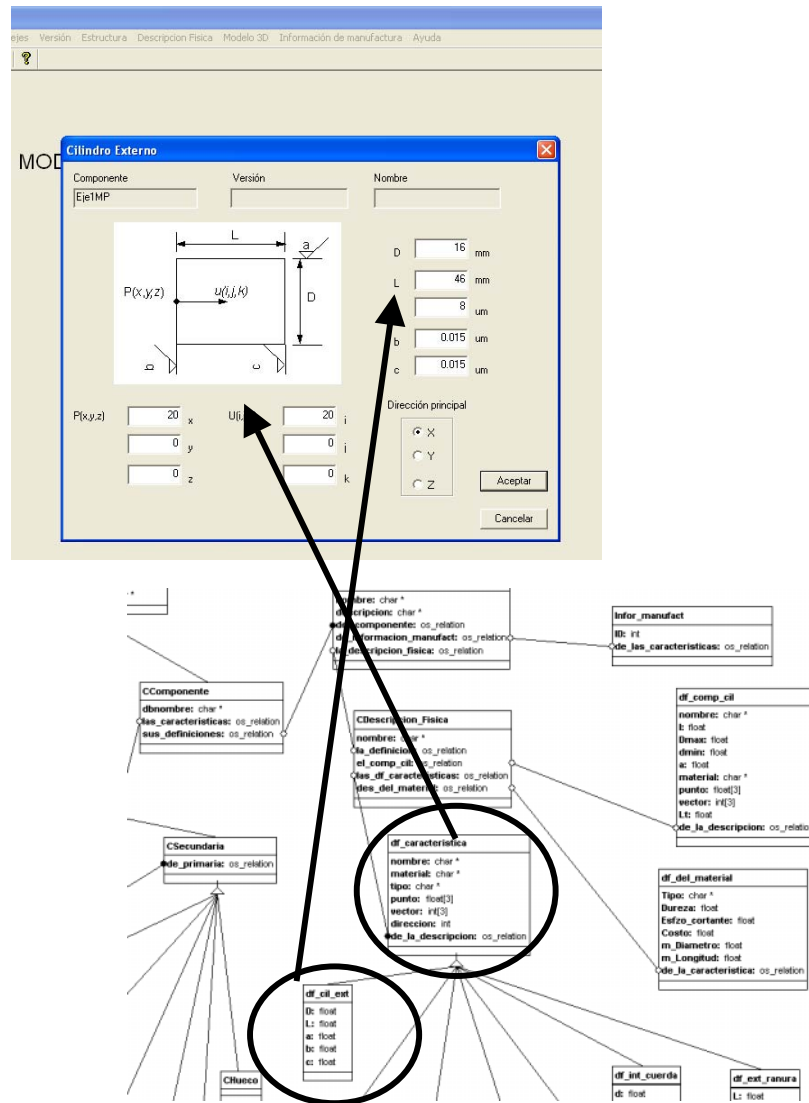


Figura 6.7 Información en pantalla y la estructura del modelo del producto.

Lo siguiente es definir la información del material, considerando que todas las primitivas del producto son de un mismo material, este sólo es necesario definirlo una vez en la pantalla que se muestra en la figura 6.8.

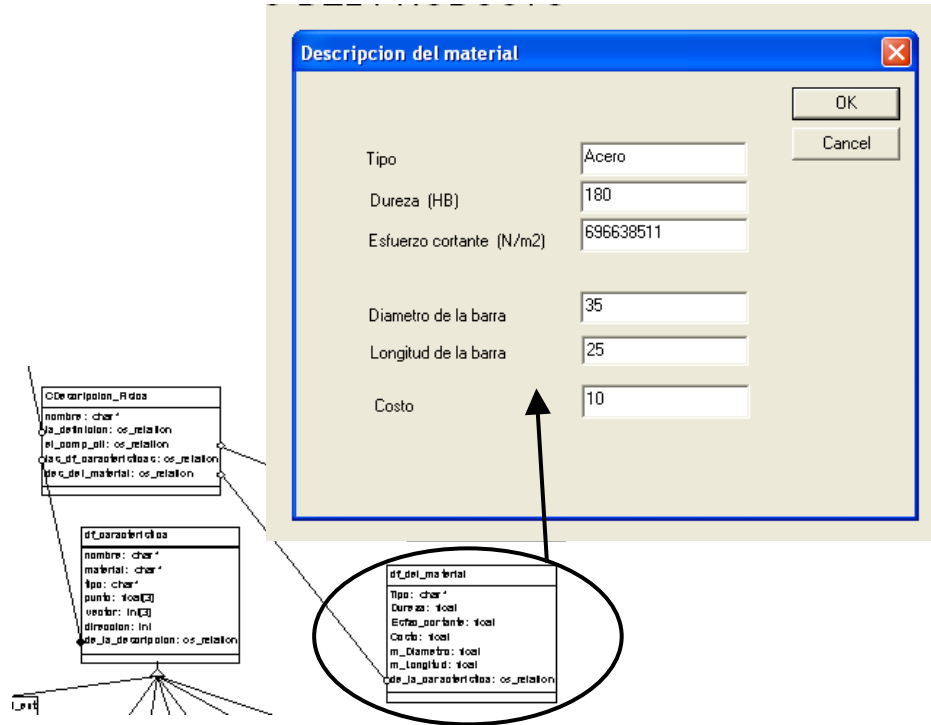


Figura 6.8 Descripción del material

Una vez definida la estructura física de la pieza, el programa la verifica, en especial busca que no falte definir alguna dimensión. La figura 6.9 muestra la pantalla de verificación de dimensiones, si falta algún dato se indica cual de ellos está faltando, en caso contrario la pantalla estará en blanco

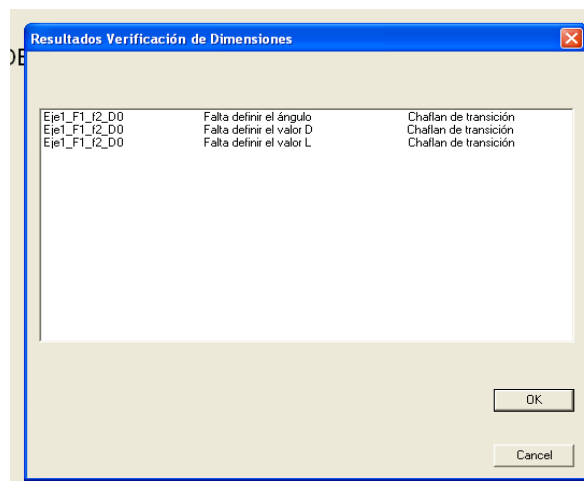


Figura 6.9 Verificación de dimensiones.

La figura 6.10, muestra la pieza del caso de estudio y la identificación de sus características en la base datos.

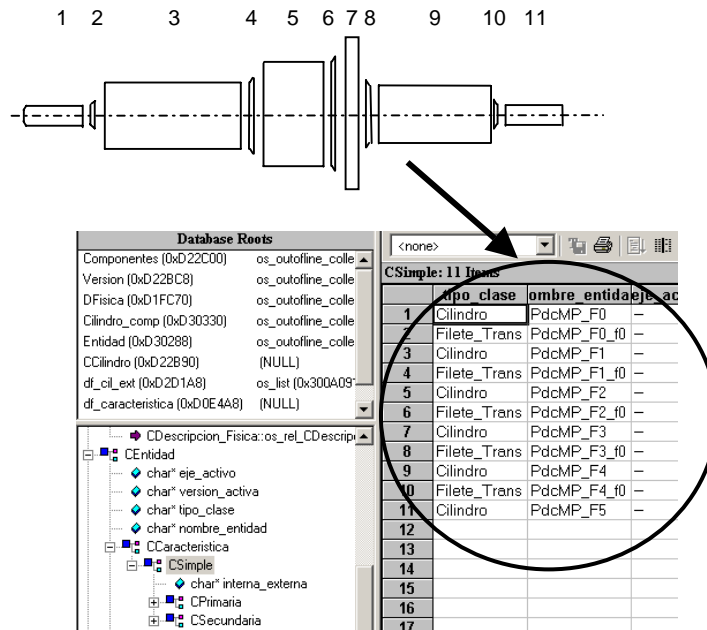


Figura 6.10 Identificación de características en la base de datos.

### 6.4 Introducción de información en el modelo de manufactura.

Este modelo contiene la información relacionada con las instalaciones de manufactura. En un inicio se supone que no existen instalaciones de manufactura alguna, y que éstas serán definidas por la configuración de maquinaria. El modelo de manufactura contiene la información de una máquina configurada y el o los proceso requeridos para manufacturar una pieza. La figura 6.11 muestra la relación entre los recursos mostrados en pantalla y la estructura del modelo de manufactura.

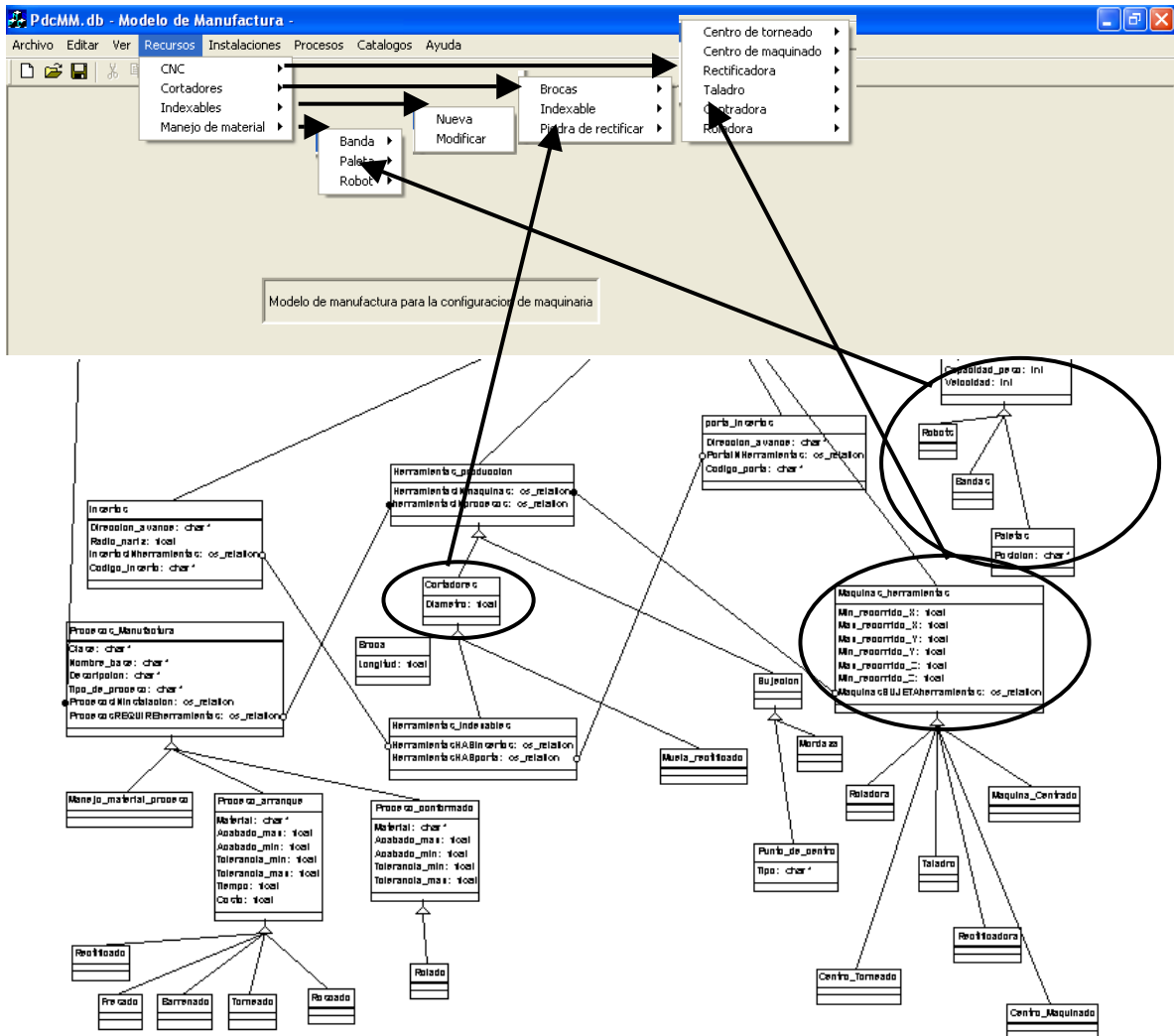


Figura 6.11 Relación entre la pantalla de recursos y la estructura del modelo de manufactura.

La configuración de maquinaria se enfoca principalmente a un proceso de torneado, sin embargo, el programa puede almacenar información sobre diferentes tipos de procesos. La figura 6.12 muestra la relación entre la pantalla con los procesos y la estructura del modelo de manufactura.

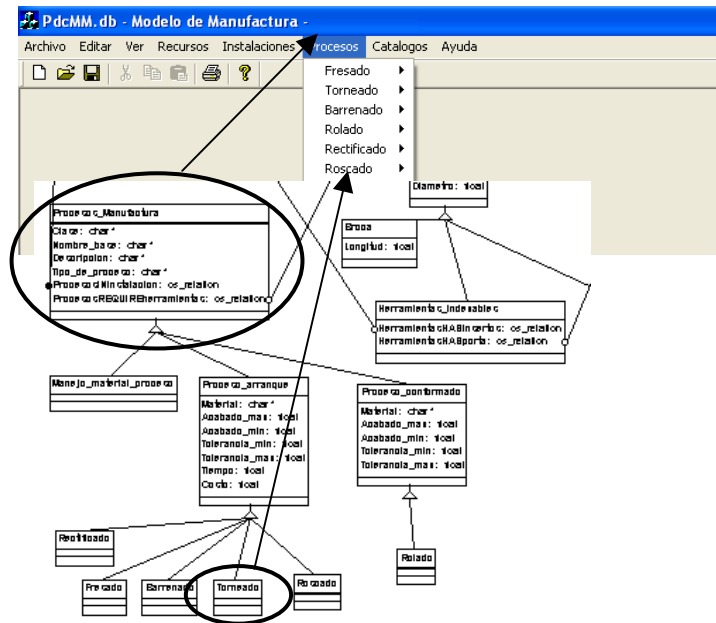


Figura 6.12 Relación entre la pantalla de recursos y la estructura del modelo de manufactura.

La información proporcionada por la configuración de maquinaria sobre el proceso se muestra en la figura 6.13 y es la única que contiene el modelo de manufactura.

Figura 6.12 Información del proceso de torneado.

### 6.5 Introducción de información en el modelo de catálogos.

De la pantalla principal del modelo de manufactura se ejecuta el modelo de catálogos, se pensó de esta manera considerando la relación que existe con los recursos de manufactura, “recursos de manufactura tienen catálogos”. La figura 6.14 muestra la relación entre la información mostrada en la pantalla y la estructura del modelo de catálogos.

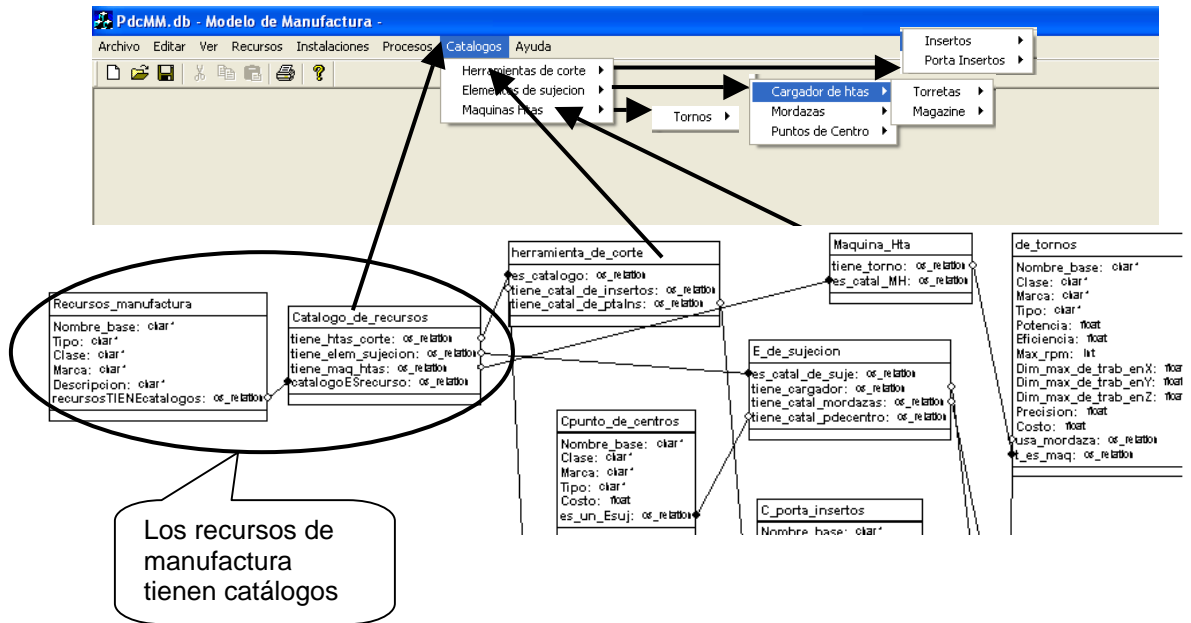


Figura 6.14 Modelo de catálogos.

#### 6.5.1 El catálogo de insertos y porta insertos.

Este catálogo contiene la información de diferentes marcas de insertos, la pantalla principal para el llenado de datos se muestra en la figura 6.14.

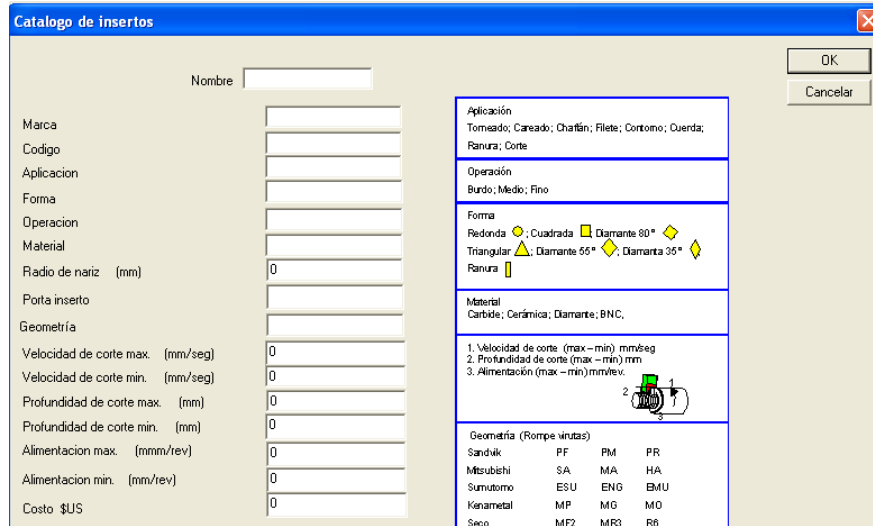


Figura 6.14 Catálogo de insertos

El catálogo de insertos se pobló, en este caso, sólo con información de dos proveedores, algnos de los datos contenidos en la base de datos de insertos se muestran junto con la estructura del modelo en la figura 6.15.

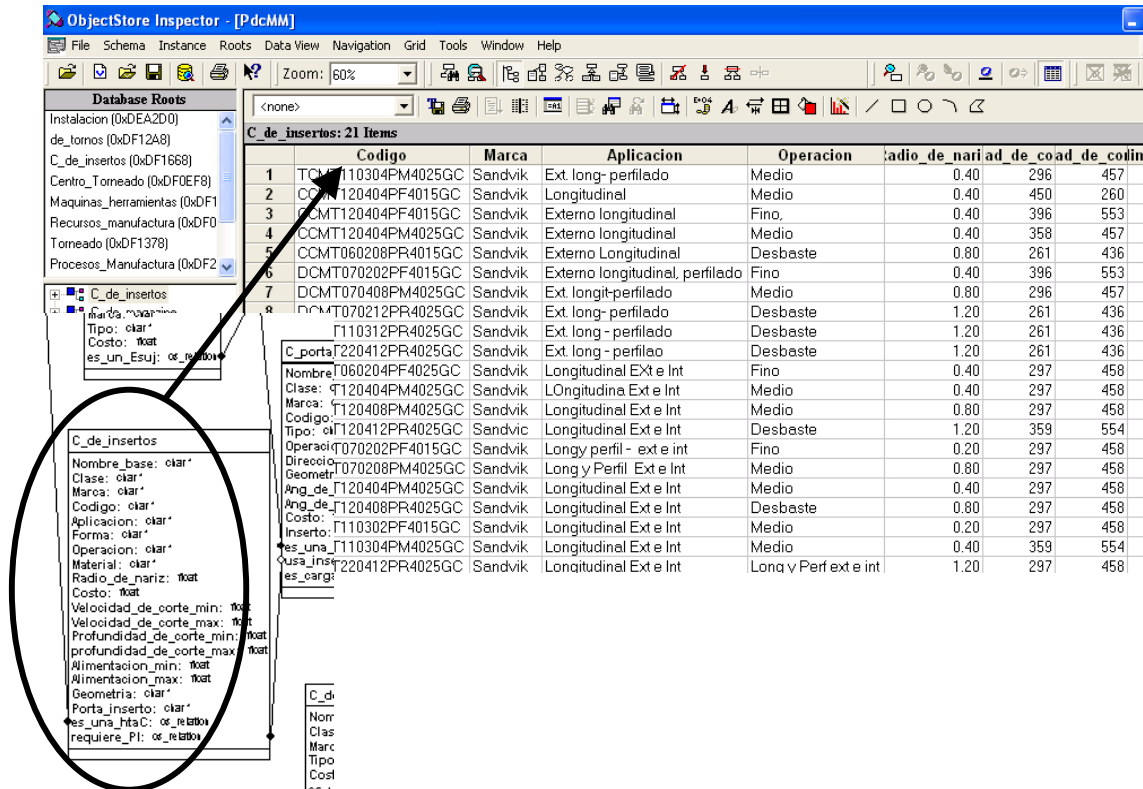


Figura 6.15. Información de insertos almacenados en la base de datos.



La base de insertos puede ser consultada por el usuario, los datos almacenados se pueden editar, modificar o borrar. La figura 6.16 muestra la pantalla que permite consultar los datos de insertos.

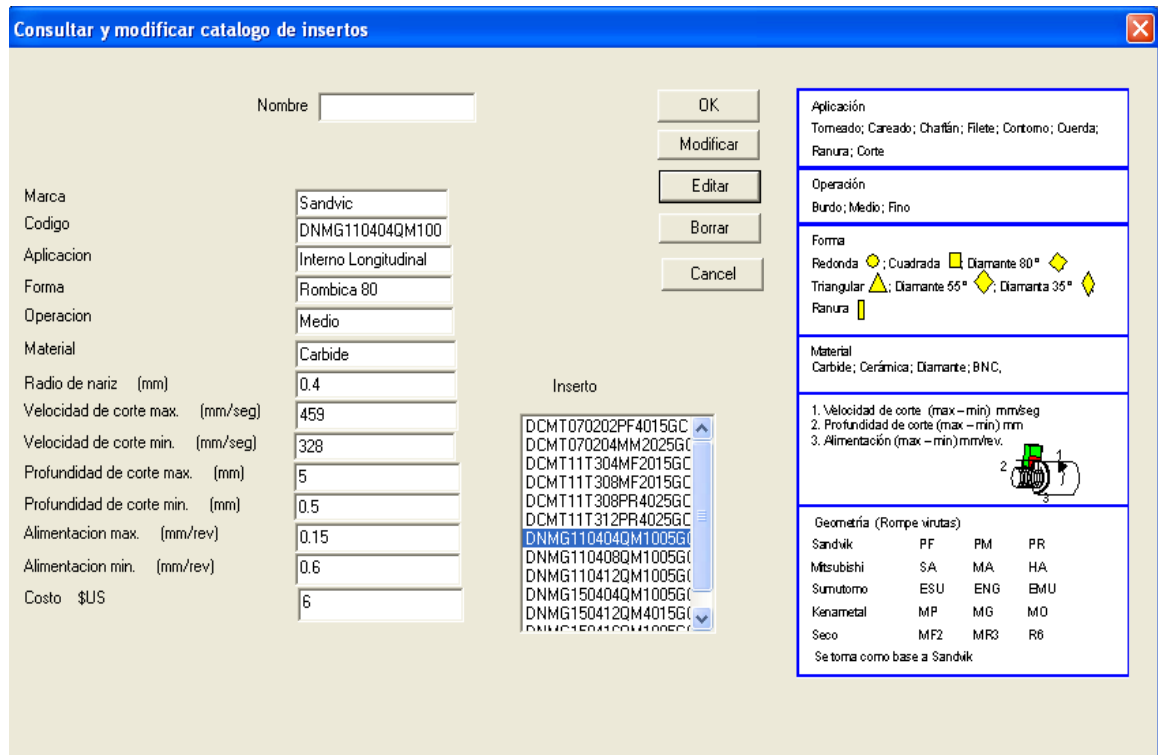


Figura 6.16 Pantalla para consultar datos de insertos.

La base de datos del porta inserto contiene datos de los mismos fabricantes de insertos la pantalla para introducir datos se muestra en la figura 6.17.

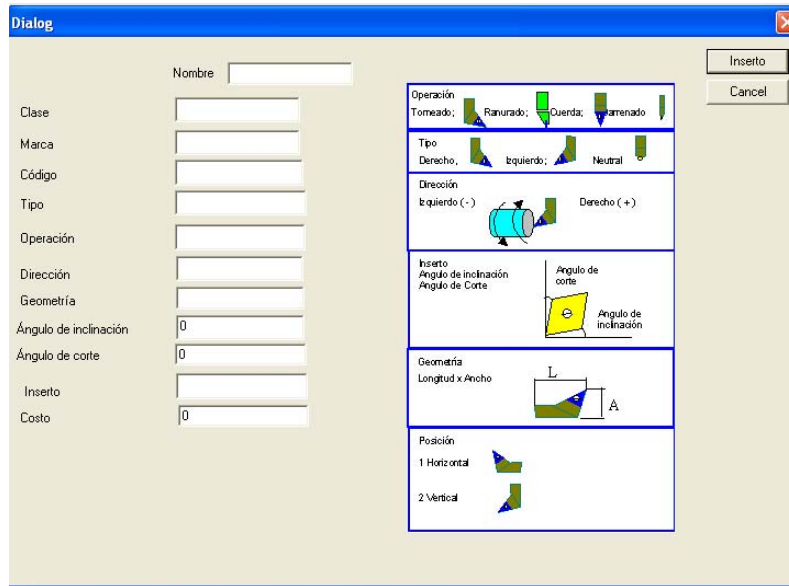


Figura 6.17 Pantalla para poblar el catálogo de porta insertos

En la figura 6.18 se puede observar la información del porta inserto en la base de datos y parte de la estructura del modelo.

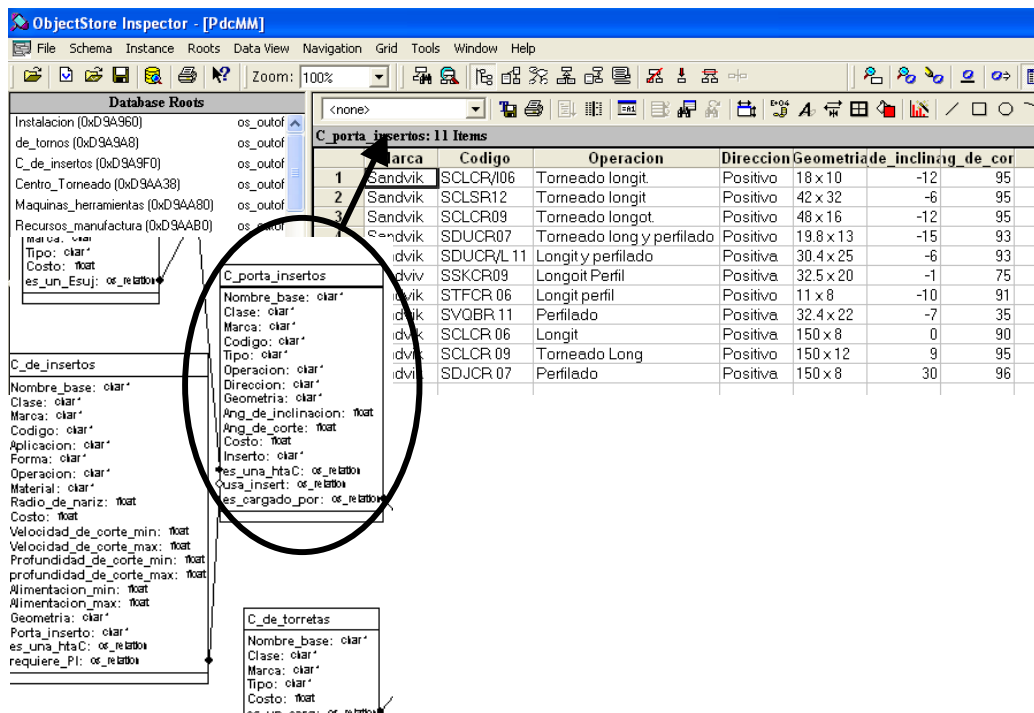


Figura 6.18 Información del porta insertos almacenados en la base de datos.

### 6.5.2 El catalogo de máquinas

Los catálogos de máquinas a diferencia de los de insertos y porta insertos, no tienen un formato con una información estándar. En catálogo de máquinas se incluye información de importancia para la configuración de maquinaria. Se incluyeron datos de dos fabricantes, la información contenida en la base y su relación con la estructura del modelo se muestra en la figura 6.19, así como la pantalla para introducir los datos.

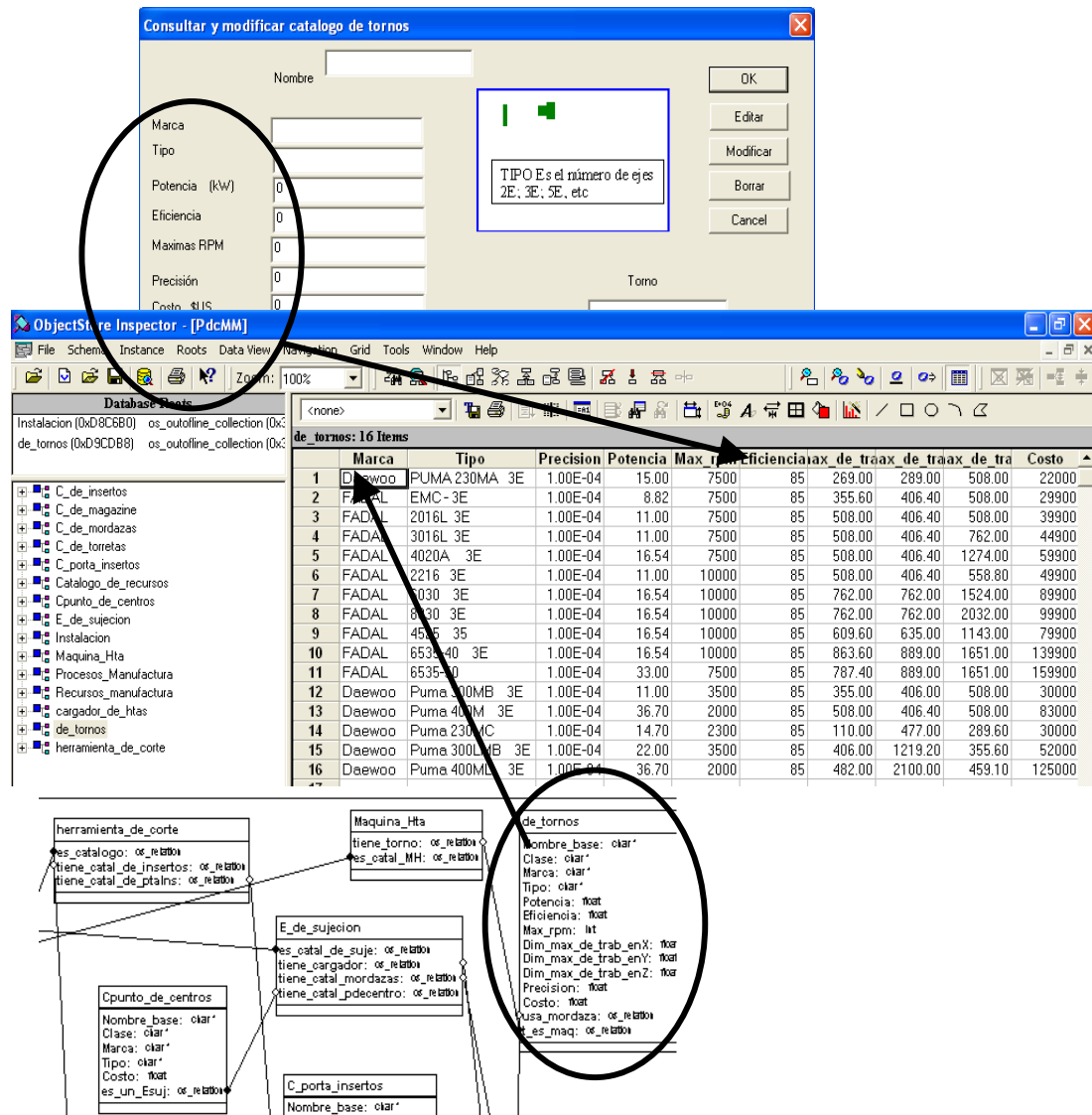


Figura 6.19. Información en el catálogo de máquinas.

### 6.5.3 El catálogo de mordazas

Esta base de datos contiene información específica sobre las mordazas, se refiere especialmente a la fuerza de sujeción y tamaño de la pieza de trabajo. La figura 6.20 muestra la pantalla para poblar la base, la información dentro de ésta y su relación con la estructura del modelo.

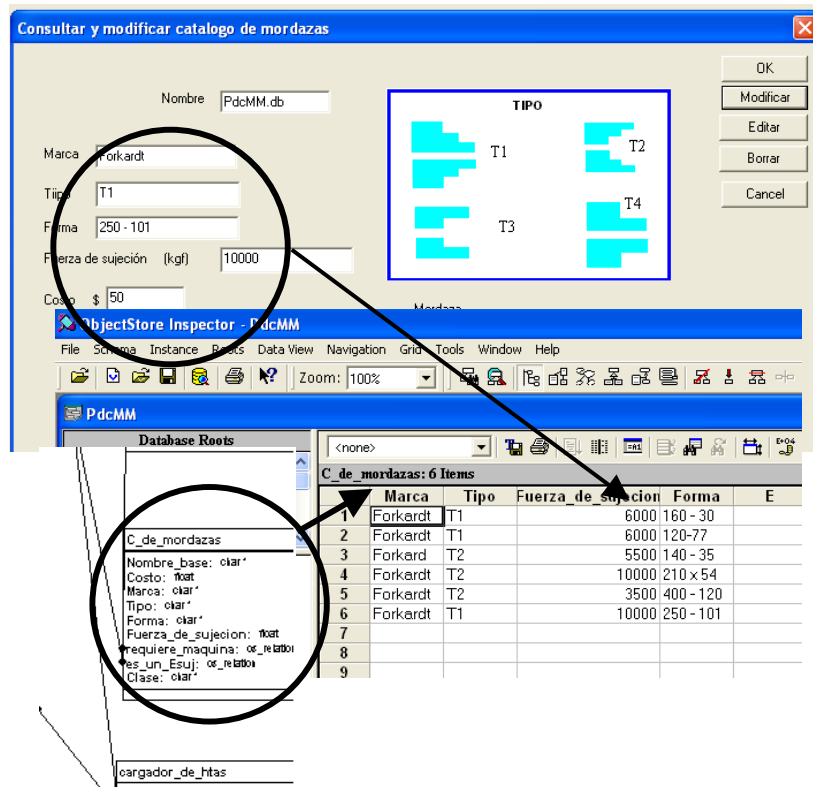


Figura 6.20 Pantalla para introducir datos, la base de datos de mordazas y su relación con la estructura del modelo.

**6.6 Definición de la información por la configuración de maquinaria.**

Cuando una configuración de maquinaria se ejecuta (punto 2 de la figura 6.2), el resultado de esta se muestra, en parte, en la figura 6.21, en la cual se presenta un listado con los recursos existentes en los catálogos, por ejemplo, la figura muestra que se requiere una máquina de torneado de 15 kW, los fabricantes disponibles son Daewoo y Fadal. Los insertos encontrados son: DNMG15060 y DNMX150608 que son fabricados por Sandvic.

Característica	Proceso	Máquina	Fabricante	Inserto	Porta Inserto	Fabricante	Mordaza	Fabricante
C1	Torneado	Turmo 15 kW	Daewoo	DNMG15060	DDJNR/L12	Sandvic	ISO:2405	Incluido
C2	Medio		Fadal	8				
C3	Fino	*		DNMX15060		*		
c4	*	*	*	8	*	*		*
C5	*	*	*	*	*	*	*	*
C6	*	*	*	*	*	*	*	*
C7	*	*	*	*	*	*	*	*
C8	*	*	*	*	*	*	*	*
C9	*	*	*	*	*	*	*	*
C10	*	*	*	*	*	*	*	*
C11	*	*	*	*	*	*	*	*
C12	*	*	*	*	*	*	*	*

Figura 6.21 Lista de recursos.

El Módulo 2, el cual determina a los recursos que mejor cumplen con la relación producción costo calidad, entrega el listado mostrado en la figura 6.22, en donde se presenta un grupo específico de recursos de manufactura, en este caso se están comparando dos tipos de insertos, se indican las condiciones de operación, el tiempo y costo de producción, así como el número de máquinas requeridas para cumplir con la producción solicitada.

La decisión final sobre que recursos de manufactura se seleccionarán, depende de las estrategias de producción, que son tratadas en esta investigación.

La configuración de maquinaria muestra el mínimo costo y tiempo de producción, para un grupo de recursos.

Maquina	Puma 230MA								
Inserto	DNMG150608								
Porta Ins	DDJNR 12								
Mordaza	3QLC DIN:2405								
Mínimo costo de producción									
Tp	Cp	V	f	d	Vida útil	Tiempo total	Costo total	Número de	
(min)	(\$)	(mm/min)	(mm/r)	(mm)	(min)	(min)	(\$)	Máquinas	
4.510	1.312	326	0.435	2.5	29.9	1804	524	4	
Mínimo tiempo de producción									
Tp	Cp	V	f	d	Vida útil	Tiempo total	Costo total	Número de	
(min)	(\$)	(mm/min)	(mm/r)	(mm)	(min)	(min)	(\$)	Máquinas	
3.710	1.906	404	0.500	2.5	28.0	1480	762	3	
Maquina	Puma 230MA								
Inserto	DNMX 150608								
Porta Ins	DDJNR 12								
Mordaza	3QLC DIN:2405								
Mínimo costo de producción									
Tp	Cp	V	f	d	Vida útil	Tiempo total	Costo total	Número de	
(min)	(\$)	(mm/min)	(mm/r)	(mm)	(min)	(min)	(\$)	Máquinas	
3.700	1.012	325	0.436	3.7	27.9	1480	404	3	
Mínimo tiempo de producción									
Tp	Cp	V	f	d	Vida útil	Tiempo total	Costo total	Número de	
(min)	(\$)	(mm/min)	(mm/r)	(mm)	(min)	(min)	(\$)	Máquinas	
3.010	1.460	449	0.670	3.746	26.0	1204	584	2.5	

Figura 6.22 listado con resultados de la configuración de maquinaria

Es necesario destacar, que dependiendo de la cantidad de fabricantes considerados en los catálogos, será necesario ejecutar su evaluación y por lo tanto, el tiempo de ejecución de la aplicación dependerá también del número de evaluaciones.

Los resultados presentados en éste listado son vaciados en el modelo de manufactura. La figura 6.23 muestra los resultados vaciados al modelo de manufactura, especialmente, sobre la máquina, el inserto y el proceso.

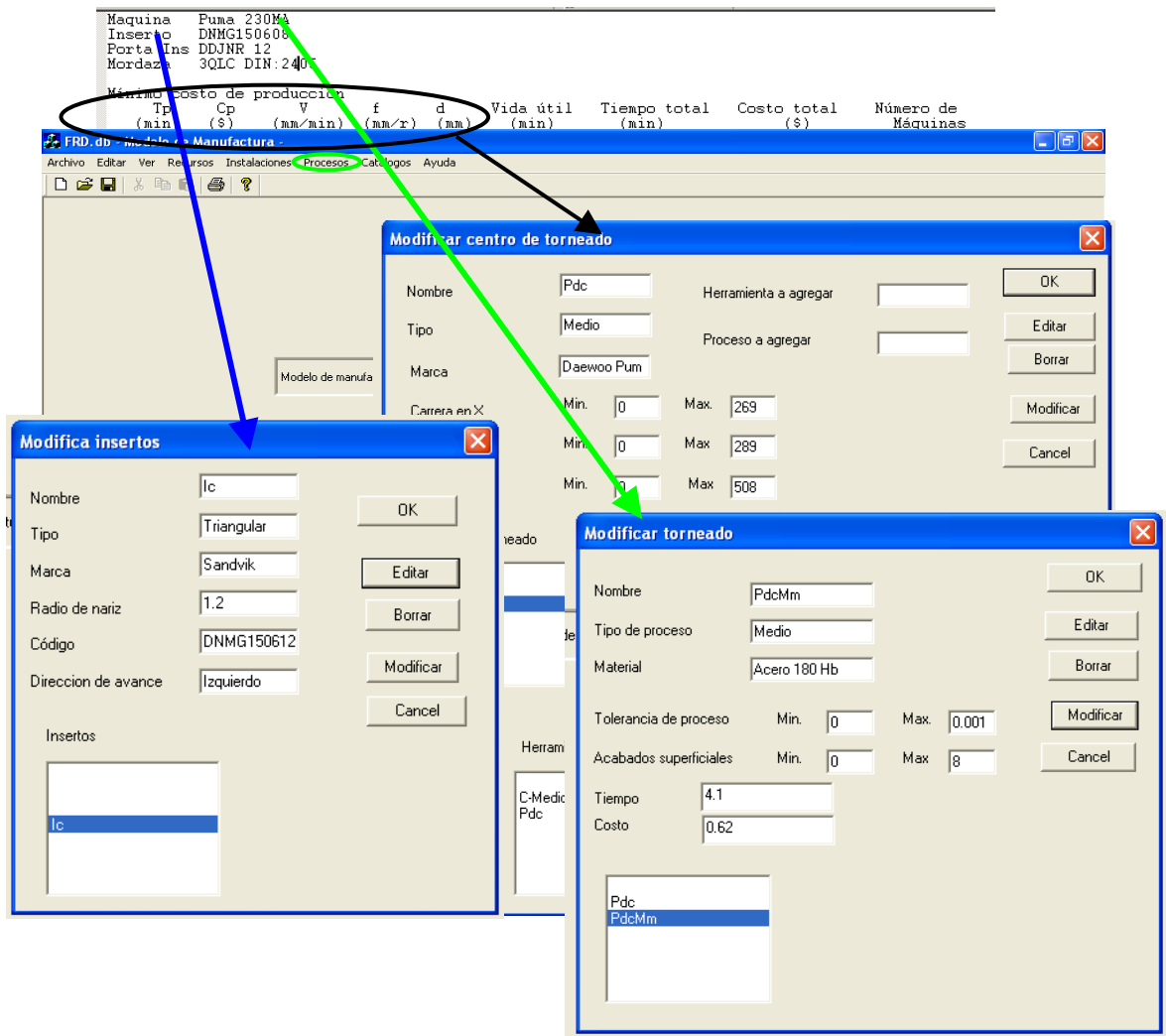


Figura 6.23 Resultados de la configuración en el modelo de manufactura.

# Conclusiones



1. El autor de esta investigación ha definido un proceso original para configurar máquinas herramientas.
  - El proceso presenta un enfoque concurrente para la selección de recursos de manufactura, establece los requerimientos para su realización puntualizándose la necesidad de integrar la información del producto y de los recursos de manufactura disponibles en las instalaciones actuales y aquellos ofrecidos en los catálogos de los fabricantes.
  - En el proceso propuesto, el autor involucra tres aspectos que a su juicio son fundamentales para configurar maquinaria:
    - Las especificaciones de diseño
    - Los recursos de manufactura
    - Las condiciones de operaciónAbordándose así el problema de configuración de maquinaria en una forma más amplia a la que se encontró en las referencias sintetizadas en la sección 1.2.
  - Las tres categorías de información definidas en esta investigación, las cuales son: i) la información relacionada con el producto, ii) la capacidad de manufactura de las instalaciones actuales existentes y iii) la información comercial de los recursos de manufactura, y que se emplearon para especificar el proceso de configuración de maquinaria, son las adecuadas, con ellas se permitió representar el proceso por medio de diagramas IDEF0.
2. El sistema CAE propuesto permite integrar la información requerida por el proceso de configuración de maquinaria.
  - Los tres modelos de información que constituyen el sistema, el modelo del producto, de manufactura y catálogos, son los adecuados, con ellos se permite representar a las tres categorías de información mencionadas en el punto 1.
  - La estructura del modelo de catálogos es la adecuada para captar y representar los datos de fabricantes de recursos de manufactura (máquinas herramientas, insertos, porta insertos y mordazas).
  - El modelo de catálogos ligado al de manufactura, es de utilidad puesto que se crea una fuente de recursos de manufactura adicional para configurar máquinas herramientas. Con el modelo de catálogos la selección de recursos no se limita a los que están dentro de las instalaciones de manufactura.

- 
- La representación del proceso de configuración de maquinaria mediante diagramas DEF0, produjo buenos resultados. Con tal representación fue posible determinar los elementos requeridos para proponer un sistema CAE.
  - El empleo de las metodologías IDEF0, el análisis orientado a objetos y UML resultó adecuada para estructurar la información en los modelos.
3. La aplicación computacional desarrollada por el autor, la cual involucra el proceso y el sistema CAE propuestos, generó resultados satisfactorios al ser probado con caso de estudio.
- Permite la integración de la información del producto, de las instalaciones de manufactura, de la configuración definida y la información comercial de fabricantes de recursos de manufactura.
  - El uso de las redes neuronales artificiales para determinar recursos de manufactura, es un trabajo original. El autor en su revisión bibliográfica, no encontró antecedente alguno en el uso de redes neuronales artificiales para determinar recursos de manufactura. La red neuronal del tipo *backpropagation* y sus estructuras definidas en la sección 4.6, es un mecanismo viable para esto. Con la red *backpropagation* fue posible determinar los recursos necesarios para manufacturar la pieza definida en el caso de estudio.
  - La relación producción-costo-calidad, modelada por medio de las funciones objetivo definidas en la sección (3.3.4.3) y resueltas mediante el algoritmo descrito en el apéndice B, es un mecanismo de control para alcanzar un balance entre sus elementos.
  - La propuesta del uso de algoritmos genéticos para la obtención de la condiciones de operación que equilibren la relación producción-costo-calidad es adecuada. Con ella fue posible resolver a las tres funciones objetivos que representan la producción, el costo y la calidad, encontrándose valores que satisfacen a las restricciones impuestas al problema.
4. La aplicación de un caso de estudio ha verificado la utilidad del proceso y del sistema propuesto por esta investigación.

5. El uso de la metodología propuesta para el desarrollo de esta tesis, fue efectiva al definir un proceso de configuración y la estructura de los modelos de información.

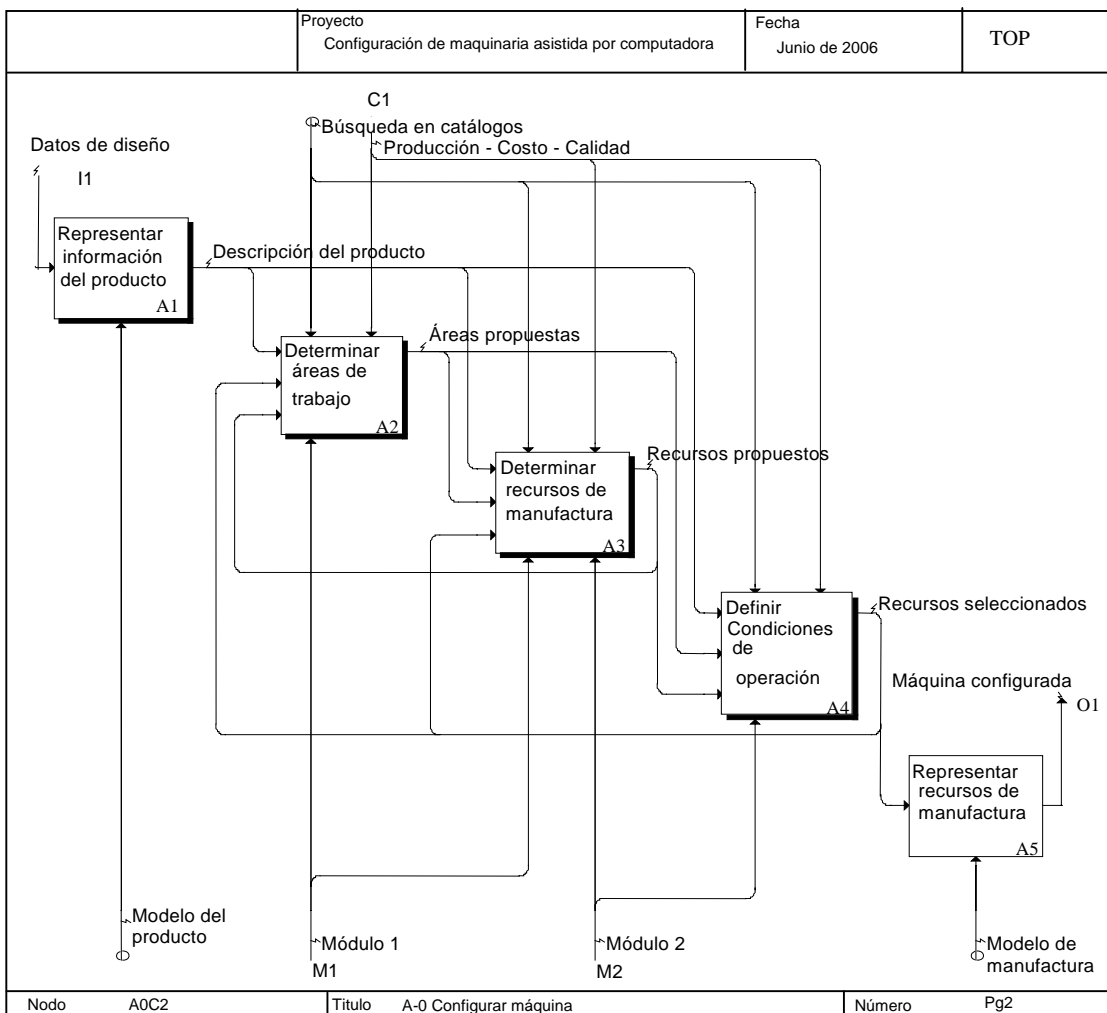
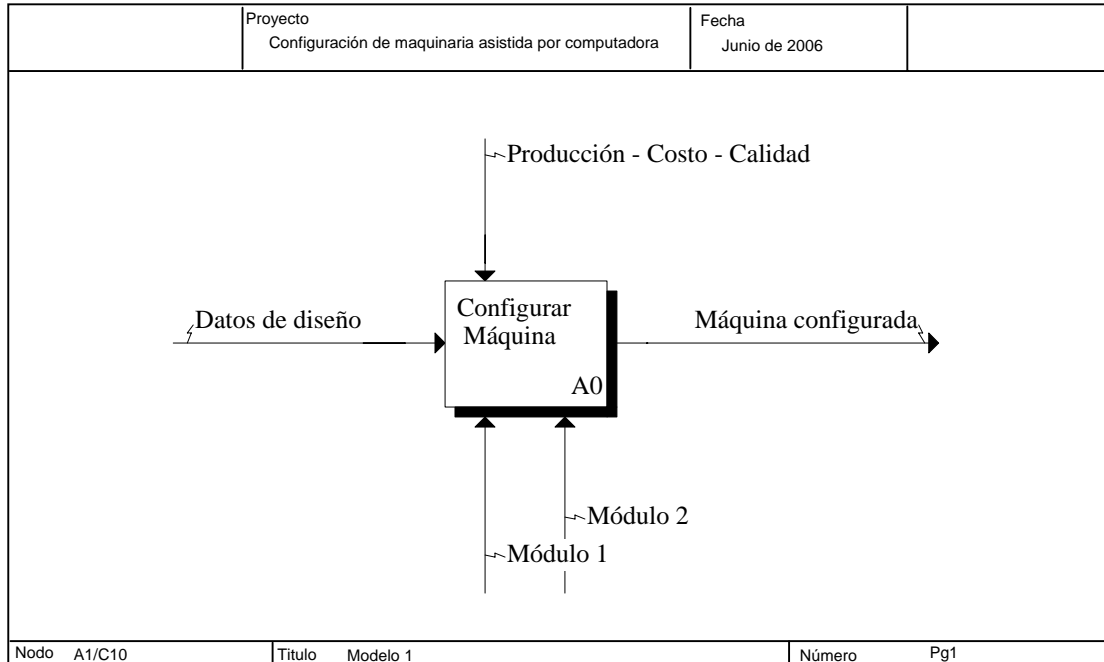
### **Trabajos a futuro**

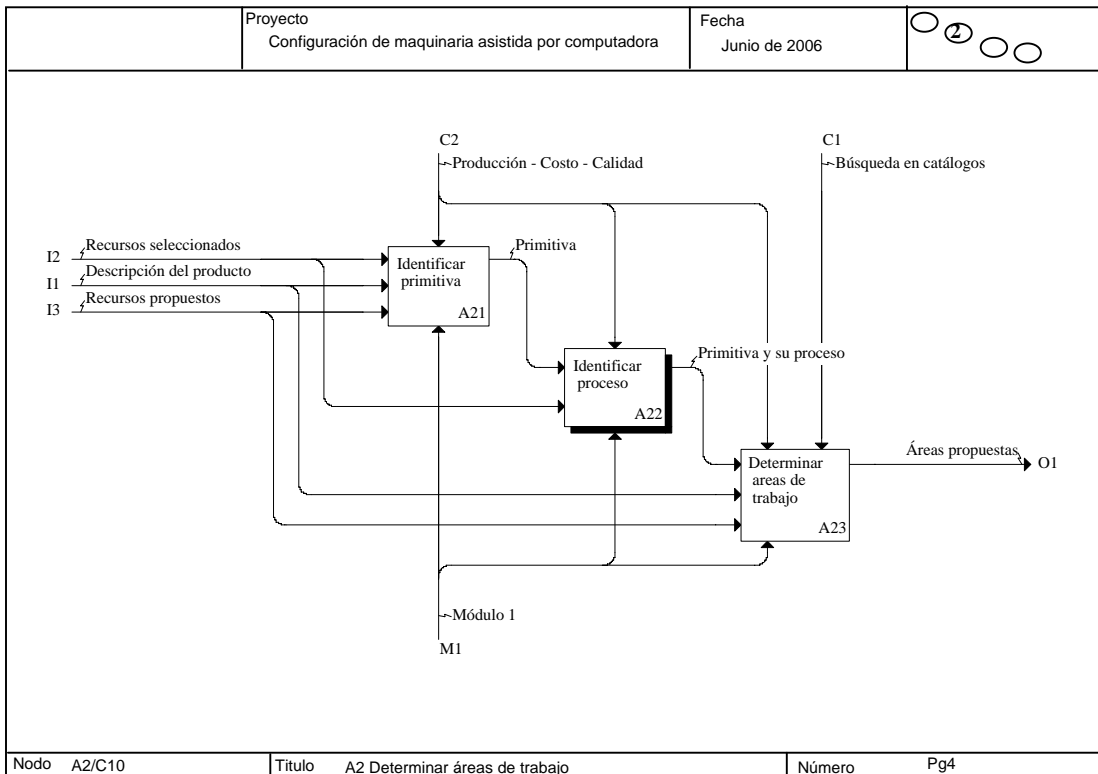
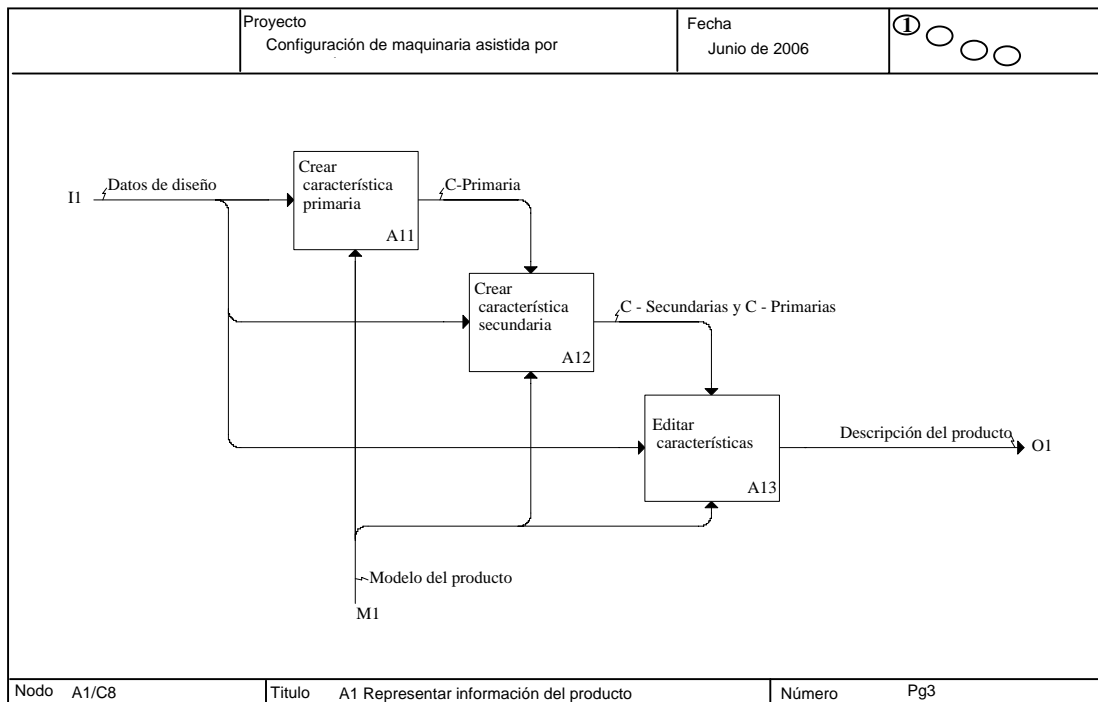
Es recomendable buscar la compatibilidad entre los modelos de información hasta la fecha desarrollados, con sistemas comerciales (modeladores en 3D, simuladores de manufactura, etc.) para proyectar una aplicación más allá de lo académico, no solo de los modelos, sino también de las aplicaciones que de estos resulten.

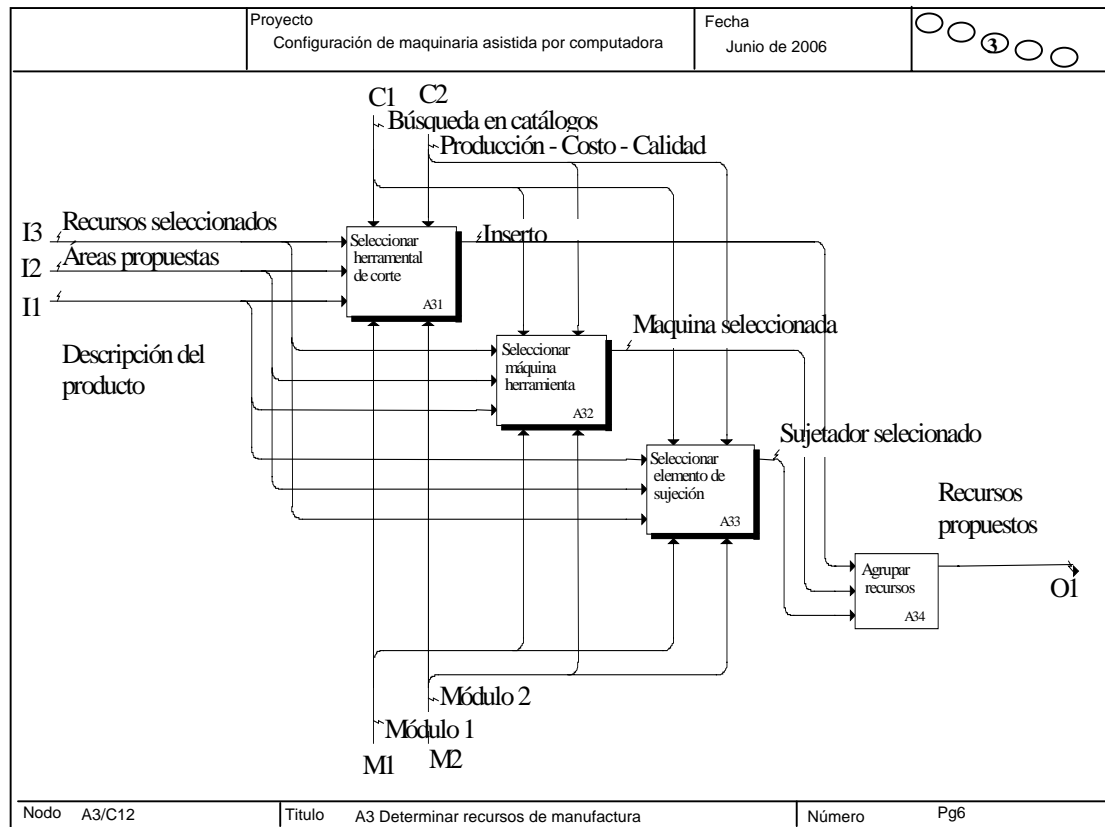
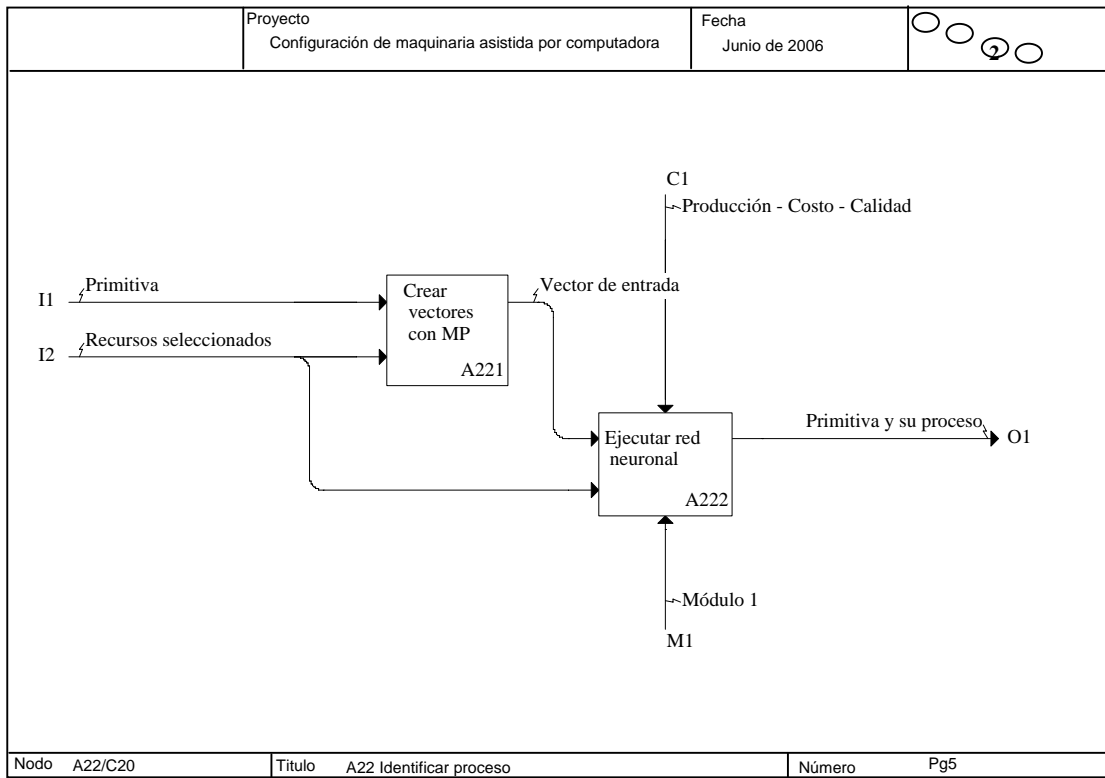
Es recomendable hacer extensiones a los modelos del producto y de catálogos para aplicarse a productos generados por otros procesos de maquinado (fresado), e integrar las bases de datos disponible en línea por fabricantes, de esta manera se tendría una fuente complementaria de recursos en catálogos.

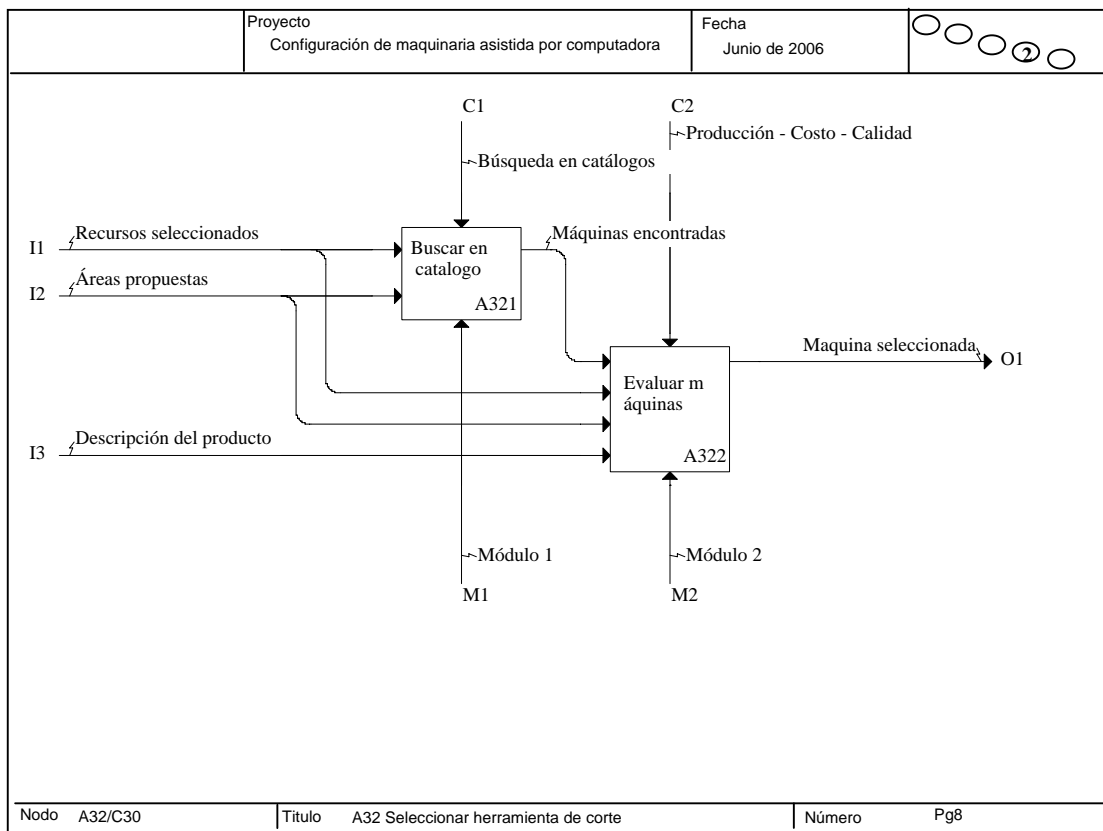
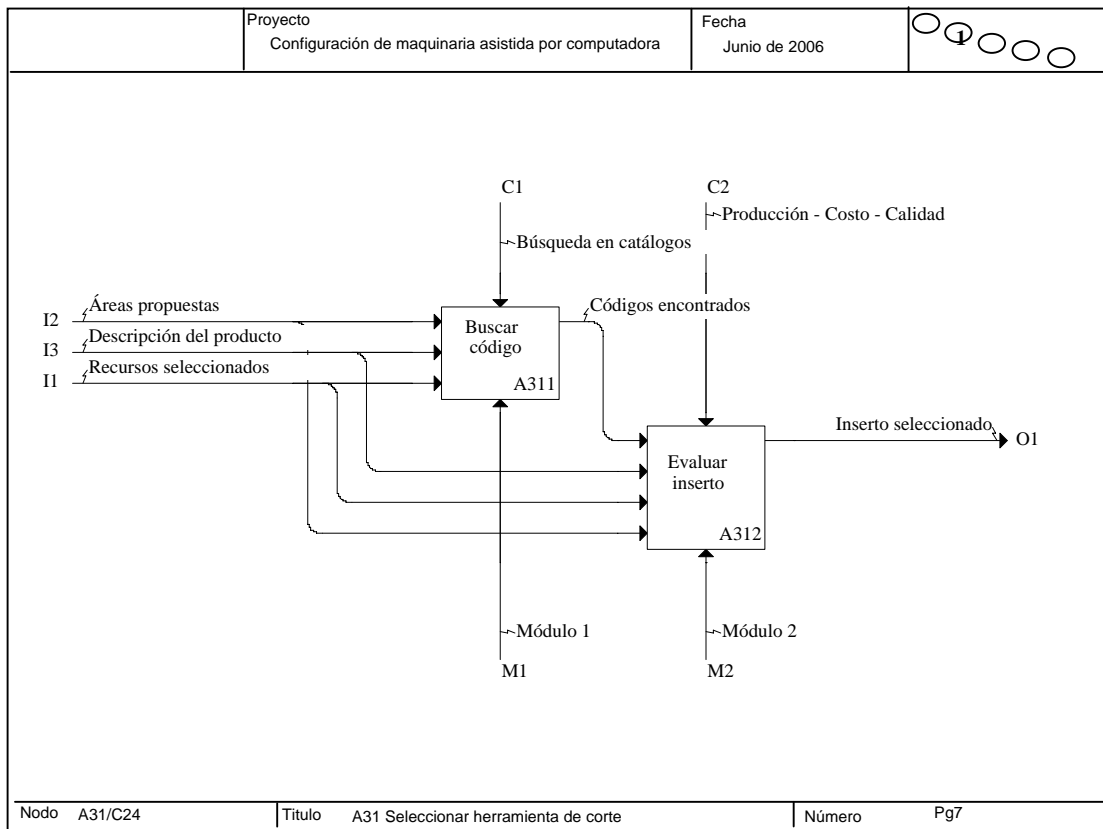
Se recomienda la implementación de la configuración de maquinaria para piezas complejas que involucren mas tipos de primitivas.

# Apéndice A

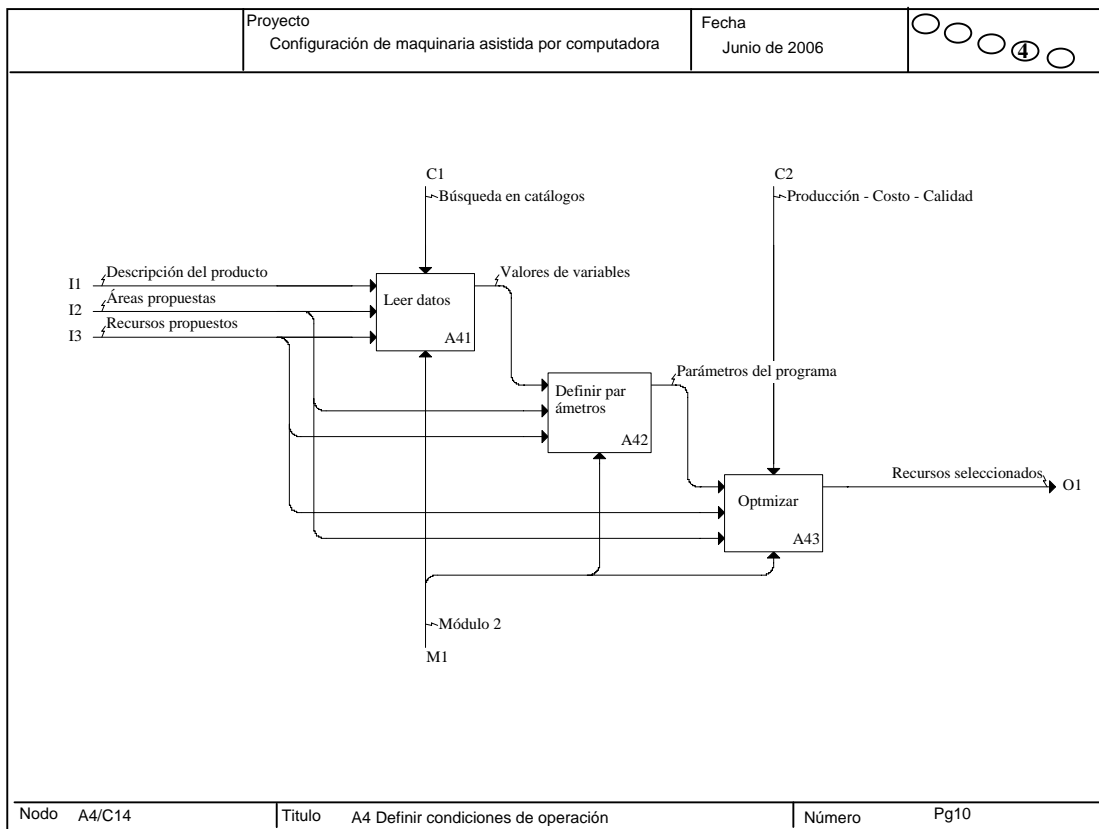
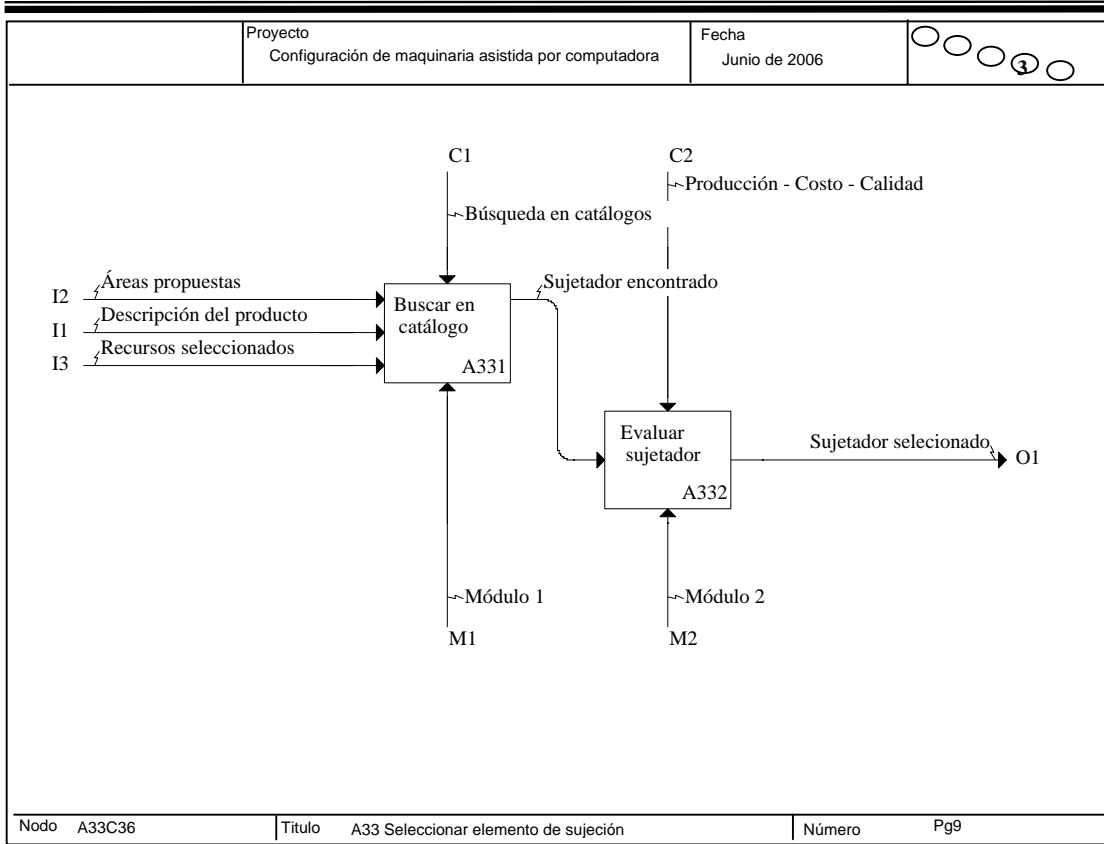












## **Apéndice B**

**Algoritmo de aprendizaje *Backpropagation***

**Algoritmo de sorteo no dominado NSGA-II**

## Algoritmo de aprendizaje Backpropagation

### Definiciones

#### Unidad de procesamiento

Una neurona, o unidad procesadora, sobre un conjunto de nodos  $N$ , es una tripleta  $(X, f; Y)$ , donde  $X$  es un subconjunto de  $N$ ,  $Y$  es un único nodo de  $N$  y  $f: \rightarrow$  es una función neuronal (también llamada función activación) que calcula un valor de salida para  $Y$  basado en una

combinación lineal de los valores de las componentes de  $X$ , es decir,  $Y = f\left(\sum_{x_i \in X} w_i x_i\right)$  Los

elementos  $X$ ,  $Y$  y  $f$  se denominan conjunto de nodos de entrada, conjunto de nodos de salida, y función neuronal de la unidad neuronal, respectivamente.

#### Definición de red neuronal

Una red neuronal artificial (RNA) es un par  $(N, U)$ , donde  $N$  es un conjunto de nodos y  $U$  es un conjunto de unidades procesadoras sobre  $N$  que satisface la siguiente condición: Cada nodo  $X_i \in N$  tiene que ser un nodo de entrada o de salida de al menos una unidad procesadora de  $U$ .

#### Definición de capa de entrada

Una unidad se dice que está en la capa de entrada de una red neuronal  $(X, U)$ , si es la entrada de al menos un unidad funcional de  $U$  y no es la salida de ninguna unidad procesadora de  $U$ .

#### Definición de capa de salida

Una unidad se dice que está en la capa de salida de una red funcional  $(X, U)$ , si es la salida de al menos una unidad funcional de  $U$  y no es la entrada de ninguna unidad procesadora de  $U$ .

#### Definición de capa de oculta

Una unidad se dice que está en la capa intermedia de una red neuronal  $(X, U)$ , si es la entrada de al menos una unidad funcional de  $U$  y, al mismo tiempo, es la salida de al menos una unidad procesadora de  $U$ .

### Algoritmo Backpropagation

El algoritmo Backpropagation para redes multicapa (ver figura B1) trabaja bajo aprendizaje supervisado y por tanto necesita un patrón de entrenamiento que describa cada salida y su valor esperado de la siguiente forma:

$$\{p_1, t_1\}, \{p_2, t_2\}, \dots, \{p_Q, t_Q\} \quad (1)$$

Donde  $p_Q$  es una entrada a la red y  $t_Q$  es la correspondiente salida deseada para el patrón  $q$ -ésimo. El algoritmo debe ajustar los parámetros de la red para minimizar el error.

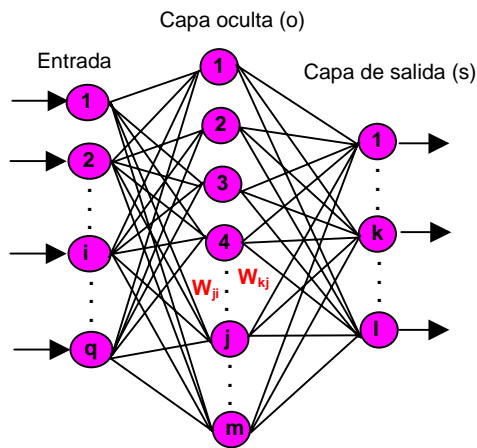


Figura B1. Disposición de una red de 3 capas

Es importante aclarar que en la figura B1,  $q$  es el número de componentes el vector de entrada.  $m$ : el número de neuronas de la capa oculta  $l$ : el número de neuronas de la capa de salida

Para iniciar el entrenamiento se introduce un patrón de entrenamiento a la red, de la siguiente forma

$$P = \begin{bmatrix} p_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ p_i \\ \cdot \\ \cdot \\ p_q \end{bmatrix} \quad (2)$$

El patrón de entrenamiento es propaga a través de las conexiones existentes produciendo una entrada neta  $n$  en cada una las neuronas de la siguiente capa, la entrada neta a la neurona  $j$  está dada por la ecuación (3), este valor es antes de pasar por la función de transferencia

$$n_j^o = \sum_{i=1}^q W_{ji}^o p_i + b_j^o \quad (3)$$

donde:

$W_{ji}^o$  =Peso que une la componente  $i$  de la entrada con la neurona  $j$  de la capa oculta

$p_i$  = Componente  $i$  del vector  $p$  que contiene el patrón de entrenamiento de  $q$  componentes

$b_j^o$  =Ganancia de la neurona  $j$  de la capa oculta

Donde el superíndice ( $^o$ ) representa la capa a la que pertenece cada parámetro, es este caso la capa oculta.

Cada una de las neuronas de la capa oculta tiene como salida  $a_i^o$  que esta dada por la ecuación (4) .

$$a_f^o = f^o \left( \sum_{j=1}^q W_{ji}^o p_i + b_j^o \right) \quad (4)$$

$f^o$  Función de transferencia de las neuronas de la capa oculta

Las salidas  $a_j^o$  de las neuronas de la capa oculta (de  $l$  componentes) son las entradas a los pesos de conexión de la capa de salida, este comportamiento esta descrito por la ecuación (5)

$$n_k^s = \sum_{j=1}^m W_{kj}^s a_j^o + b_k^s \quad (5)$$

donde:

$W_{kj}^s$  Peso que une la neurona  $j$  de la capa oculta con la neurona  $k$  de la capa de salida, la cual cuenta con  $s$  neuronas

$a_j^0$  Salida de la neurona  $j$  de la capa oculta, la cual cuenta con  $m$  neuronas.

$b_k^s$  Ganancia de la neurona  $k$  de la capa de salida.

$n_k^s$  Entrada neta a la neurona  $k$  de la capa de salida

La red produce una salida final descrita por la ecuación (6)

$$a_k^s = f^s(n_k^s) \quad (6)$$

en donde:

$f^s$  Función de transferencia de las neuronas de la capa de salida.

Reemplazando (5) en (6) se obtiene la salida de la red en función de la entrada neta y de los pesos de conexión con la última capa oculta

$$a_k^s = f^s\left(\sum_{j=1}^m W_{kj}^s a_j^0 + b_k^s\right) \quad (7)$$

La salida de la red de cada neurona  $a_k^s$  se compara con la salida deseada  $t_k$  para calcular el error en cada unidad de salida (8)

$$\delta_k = (t_k - a_k^s) \quad (8)$$

El error debido a cada patrón  $p$  propagado está dado por (10).

$$ep^2 = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^s (\delta_k)^2 \quad (9)$$

en donde:

$ep^2$  Error medio cuadrático para cada patrón de entrada  $p$ .

$\delta_k$  Error en la neurona  $k$  de la capa de salida con  $l$  neuronas.

Este proceso se repite para el número total de patrones de entrenamiento ( $r$ ), el objetivo del algoritmo es actualizar todos los pesos y ganancias de la red minimizando el error medio cuadrático total que se describe en (10).

$$e^2 = \sum_{p=1}^r ep^2 \quad (10)$$

en donde:

$e^2$  Es el error total en el proceso de aprendizaje en una iteración luego de haber presentado a la red los  $r$  patrones de entrenamiento

El error que genera una red neuronal en función de sus pesos, genera un espacio de  $n$  dimensiones, donde  $n$  es el número de pesos de conexión de la red, al evaluar el gradiente del error en un punto de esta superficie se obtendrá la dirección en la cual la función del error tendrá un mayor crecimiento, como el objetivo del proceso de aprendizaje es minimizar el error, debe tomarse la dirección negativa del gradiente para obtener el mayor decremento del error y de esta forma su minimización, condición requerida para realizar la actualización de la matriz de pesos en el algoritmo Backpropagation:

$$W_{k+1} = W_k - \alpha \nabla ep^2 \quad (11)$$

El gradiente negativo de  $ep^2$  se denotara como  $-\nabla ep^2$  y se calcula como la derivada del error respecto a todos los pesos de la red.

En la capa de salida el gradiente negativo del error con respecto a los pesos es:

$$-\frac{\partial ep^2}{\partial W_{kj}^s} = -\frac{\partial}{\partial W_{kj}^s} \left( \frac{1}{2} \sum_{k=1}^l (t_k - a_k^s)^2 \right) = (t_k - a_k^s) \times \frac{\partial a_k^s}{\partial W_{kj}^s} \quad (12)$$

Donde:

$-\frac{\partial ep^2}{\partial W_{kj}^s}$  Es el componente del gradiente  $-\nabla ep^2$  respecto al peso de la conexión de la

neurona de la capa de salida y la neurona  $j$  de la capa oculta  $W_{kj}^s$

$\frac{\partial a_k^s}{\partial W_{kj}^s}$  Es la derivada de la salida de la neurona  $k$  de la capa de salida respecto, al peso

$W_{kj}^s$ .

Para calcular  $\frac{\partial a_k^s}{\partial W_{kj}^s}$  se debe utilizar la regla de la cadena, pues el error no es una función

explícita de los pesos de la red, de la ecuación (5) puede verse que la salida de la red

$a_k^s$  esta explícitamente en función de  $n_k^s$  y de la ecuación (6) puede verse que  $n_k^s$  esta explícitamente en función de  $W_{kj}^s$  considerando esto se genera la ecuación (12)

$$\frac{\partial a_k^s}{\partial W_{kj}^s} = \frac{\partial a_k^s}{\partial n_k^s} \times \frac{\partial n_k^s}{\partial W_{kj}^s} \quad (13)$$

Tomando la ecuación (13) y reemplazándola en la ecuación (12) se obtiene,

$$-\frac{\partial ep^2}{\partial W_{kj}^s} = (t_k - a_k^s) \times \frac{\partial a_k^s}{\partial n_k^s} \times \frac{\partial n_k^s}{\partial W_{kj}^s} \quad (14)$$

Donde:

$\frac{\partial n_k^s}{\partial W_{kj}^s}$  Es la derivada de la entrada neta a la neurona  $k$  de la capa de salida respecto a los pesos de la conexión entre las neuronas de la capa oculta y la capa de salida.

$\frac{\partial a_k^s}{\partial n_k^s}$  Es la derivada de la salida de la neurona  $k$  de la capa de salida respecto a su entrada neta.

Reemplazando en la ecuación (14) las derivadas de las ecuaciones (5) y (6) se obtiene de

$$-\frac{\partial ep^2}{\partial W_{kj}^s} = (t_k - a_k^s) \times f'^s(n_k^s) \times a_j^0 \quad (15)$$

Las funciones de transferencia utilizadas en este tipo de red deben ser continuas para que su derivada exista en todo el intervalo, ya que el término  $f'^s(n_k^s)$  es requerido para el cálculo del error.

La función de transferencia usada en la configuración de maquinaria y su respectiva derivadas es las siguientes:

$$\text{logsig} \quad f(n) = \frac{1}{1 + e^{-n}} \quad f'(n) = f(n)(1 - f(n)) \quad f'(n) = a(1 - a) \quad (16)$$

De la ecuación (15), los términos del error para las neuronas de la capa de salida están dados por la ecuación (19), la cual se le denomina comúnmente sensibilidad de la capa de salida.

$$\delta_k = (t_k - a_k^s) f'^s(n_k^s) \quad (19)$$



Este algoritmo se denomina Backpropagation o de propagación inversa debido a que el error se propaga de manera inversa al funcionamiento normal de la red, de esta forma, el algoritmo encuentra el error en el proceso de aprendizaje desde las capas más internas hasta llegar a la entrada; con base en el cálculo de este error se actualizan los pesos y ganancias de cada capa.

Después de conocer (19) se procede a encontrar el error en la capa oculta, el cual esta dado por:

$$-\frac{\partial ep^2}{\partial W_{ji}^o} = -\frac{\partial}{\partial W_{ji}^o} \left( \frac{1}{2} \sum_{k=1}^l (t_k - a_k^s)^2 \right) = \sum_{k=1}^l (t_k - a_k^s) \times \frac{\partial a_k^s}{\partial W_{ji}^o} \quad (20)$$

Para calcular el último término de la ecuación (20) se debe aplicar la regla de la cadena en varias ocasiones como se muestra en la ecuación (21) puesto que la salida de la red no es una función explícita de los pesos de la conexión entre la capa de entrada y la capa oculta

$$\frac{\partial a_k^s}{\partial W_{ji}^o} = \frac{\partial a_k^s}{\partial n_k^s} \times \frac{\partial n_k^s}{\partial a_k^o} \times \frac{\partial a_k^o}{\partial n_j^o} \times \frac{\partial n_j^o}{\partial W_{ji}^o} \quad (21)$$

Todos los términos de la ecuación (22) son derivados respecto a variables de las que dependan explícitamente, reemplazando (21) en (20) tenemos:

$$-\frac{\partial ep^2}{\partial W_{ji}^o} = \sum_{k=1}^l (t_k - a_k^s) \times \frac{\partial a_k^s}{\partial n_k^s} \times \frac{\partial n_k^s}{\partial a_k^o} \times \frac{\partial a_k^o}{\partial n_j^o} \times \frac{\partial n_j^o}{\partial W_{ji}^o} \quad (22)$$

Tomando las derivas de las ecuaciones (3) (4) (5) (6) y reemplazándolas en la ecuación (22) se obtiene la expresión del gradiente del error en la capa oculta.

$$-\frac{\partial ep^2}{\partial W_{ji}^o} = \sum_{k=1}^l (t_k - a_k^s) \times f'^s(n_k^s) \times W_{kj}^s \times f'^o(n_j^o) \times p_i \quad (23)$$

Reemplazando la ecuación (19) en la ecuación (23) se tiene:

$$-\frac{\partial ep^2}{\partial W_{ji}^o} = \sum_{k=1}^l \delta_k^s \times W_{kj}^s \times f'^o(n_j^o) \times p_i \quad (24)$$

Los términos del error para cada neurona de la capa oculta esta dado por la ecuación (25), este término también se denomina sensibilidad de la capa oculta

$$\delta_j^o = f'^o(n_j^o) \times \sum_{k=1}^l \delta_k^s W_{kj}^s \quad (25)$$

Luego de encontrar el valor del gradiente del error se procede a actualizar los pesos de todas las capas empezando por la de salida, para la capa de salida la actualización de pesos y ganancias esta dada por (26) y (27).

$$W_{kj}(t+1) = W_{kj}(t) - 2\alpha\delta_k^s \quad (26)$$

$$b_k(t+1) = b_k(t) - 2\alpha\delta_k^s \quad (27)$$

Donde  $\alpha$  Es el porcentaje de aprendizaje que varía entre 0 y 1 dependiendo de las características del problema a solucionar.

Luego de actualizar los pesos y ganancias de la capa de salida se procede a actualizar los pesos y ganancias de la capa oculta mediante las ecuaciones (28) y (29).

$$W_{ji}(t+1) = W_{ji}(t) - 2\alpha\delta_j^o p_i \quad (28)$$

$$b_j(t+1) = b_j(t) - 2\alpha\delta_j^o \quad (29)$$

Para algunos autores las sensibilidades (ec. 25) de las capas están detonadas por la letra **S**, reescribiendo las ecuaciones (19) y (25) con esta notación se obtienen las ecuaciones (30) y (31)

$$S^M = -2f^M(n^M)(t-a) \quad (30)$$

$$S^m \equiv f^m(n^m)(W^{m+1})^T s^{m+1}, \quad \text{para } m = M-1, \dots, 2, 1. \quad (31)$$

En la ecuación (30)  $M$  representa la última capa y  $S^M$  la sensibilidad para esta, la ecuación (31) expresa el cálculo de la sensibilidad capa por capa comenzando desde la última, cada uno de estos términos involucra que el término para la sensibilidad de la capa siguiente ya este calculado.

### Algoritmo de sorteo no dominado NSGA-II

Primero se describe el procedimiento de sortear una población en diferente niveles de no dominancia y la densidad de amontonamiento

Para identificar las soluciones de la primer frontera no dominada en una población de tamaño  $N$ , cada solución es comparada con cualquier otra de la población para definir si ésta es dominada. Este proceso continúa hasta encontrar todos los miembros del primer nivel de no dominancia en la población, que constituyen a todos los elementos de la primer frontera no dominada. Para localizar a los individuos de la próxima frontera no dominada, las soluciones de la primer frontera son descartadas temporalmente y el procedimiento anterior se repite. Este argumento continua hasta encontrar los siguientes niveles de no dominación. De esta manera el peor de los casos se presenta cuando hay  $N$  fronteras y en ellas existe sólo una solución. Esto requiere en total de  $O(MN^3)$  cálculos. Note que se requieren  $O(N)$  almacenamientos para este propósito. A continuación se muestra el enfoque del concepto de sorteo no dominado el cual requiere  $O(MN^2)$  cálculos.

Para cada $p \in P$	
$S_p = \phi$	Soluciones que $p$ domina
$n_p = 0$	Soluciones que dominan a $p$
para cada $q \in P$	
si $(p \prec q)$ entonces	Si $p$ domina a $q$
$S_p = S_p \cup \{q\}$	Agrega $q$ al conjunto de soluciones dominadas por $p$
también si $(q \prec p)$ entonces	Si $q$ domina a $p$
$n_p = n_p + 1$	Incrementa el contador del dominio de $p$
si $n_p = 0$ entonces	$p$ pertenece a la primer frontera
$p_{rank} = 1$	
$F_1 =_1 \cup \{p\}$	
$i = 1$	Inicia el contador de fronteras
cuando $F_i \neq \phi$	
$Q = \phi$	Para almacenar elementos de la próxima frontera
para cada $p \in F_i$	
para cada $q \in S_p$	
$n_q = n_q - 1$	
si $n_q = 0$ entonces	$q$ pertenece a la próxima frontera
$q_{rank} = i + 1$	

$$Q = Q \cup \{q\}$$

$$i = i + 1$$

$$F_i = Q$$

Primero, para cada solución se calculan dos entidades: 1) el número de soluciones que dominan a la solución  $p$ , este es  $n_p$ , y 2)  $S_p$ , un conjunto de soluciones, que  $p$  domina. Esto requiere de  $O(MN^2)$  comparaciones.

Todas las soluciones en la primer frontera no dominada tendrán su contador de dominancia en cero. Ahora, para cada solución  $p$  con  $n_p=0$ , a cada miembro ( $q$ ) de su conjunto  $S_p$  se le reduce una unidad al contador de dominancia. Esto es par que si cualquier miembro  $q$  se vuelve cero en su contador de dominancia, se pone en una lista separada  $Q$ . Estos miembros pertenecen a la segunda frontera no dominada. El proceso anterior es repetido para cada miembro de  $Q$  y con ello se identifica a la tercer frontera. El proceso continua hasta que todas las fronteras se han identificado.

Para cada solución de  $p$  en el segundo o tercer nivel de no dominancia, el contador de nominación puede ser al menos  $N-1$ . Así, cada solución  $p$  será visitado al menos  $N-1$  veces antes que su contador se convierta a cero. En este punto, la solución es asignada a niveles de no dominación y será visitado nuevamente. Puesto que hay al menos  $N-1$  soluciones, el total de complejidad es  $O(MN^2)$ . De esta manera, la complejidad total es  $O(MN^2)$ .

### Distancia de amontonamiento

Para obtener un estimado de la densidad de soluciones rodeando a un particular solución en un problema, se calcula la distancia de dos puntos en cada lado de este punto sobre las funciones objetivas. Esta cantidad  $i$  sirve como un estimado del perímetro del cuboide formado por los vértices de los vecinos más cercanos ( a esto se le conoce como distancia de amontonamiento). En la figura B2, la distancia de amontonamiento de la solución  $i$ ésima en su frontera (marcada con círculos sólidos) es la longitud promedio del lado del cuboide (marcado con línea punteada)

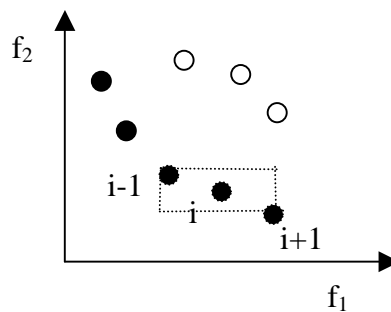


Figura B2. Densidad de aproximación.

El cálculo de la distancia de amontonamiento requiere clasificar la población de acuerdo al valor de la función objetivo en orden ascendente de magnitud. Por lo tanto, para cada función objetivo, la frontera de soluciones (soluciones con los valores mas pequeños y más grandes de la función) son asignados a un valor infinito de distancia. Los otros valores intermedios son asignados a un valor de distancias igual a la diferencia absoluta normalizada en los valores de la función de dos soluciones adyacentes. Este cálculo es aplicado a las otras funciones objetivo. El valor total de la distancia de amontonamiento es calculado como la suma de los valores de las distancias individuales correspondientes a cada objetivo. Cada función objetivo es normalizada antes de calcula la distancia de amontonamiento. El algoritmo para el cálculo de la distancia de amontonamiento de todas las soluciones en un conjunto no dominado  $I$  se muestra a continuación.

$$\begin{aligned}
 l &= |I| && \text{número de soluciones} \\
 \text{para cada } i, \text{ se establece } I[i]_{\text{distancia}} &= 0 && \text{distancia inicializada} \\
 \text{para cada función objetiva } M &&& \\
 I &= \text{sort}(I, m) && \text{clasificación usando cada función objetivo} \\
 I[1]_{\text{distancia}} &= I[l]_{\text{distancia}} = \infty && \text{los punto de la frontera son seleccionados} \\
 \text{para } i = 2 \text{ a } (l - 1) &&& \text{para todos los puntos} \\
 I[i]_{\text{distancia}} &= I[i]_{\text{distancia}} + (I[i+1]m - I[i-1]m) / (f_m^{\max} - f_m^{\min})
 \end{aligned}$$

Aquí  $I[i].m$  se refiere a la  $m_{\text{ésima}}$  valor de la función objetivo del  $i_{\text{ésimo}}$  individuo del conjunto  $I$  y los parámetros  $f_m^{\max}$  y  $f_m^{\min}$  son los valores máximos y mínimos de la  $m_{\text{ésima}}$  función objetivo. La complejidad de este procedimiento depende del algoritmo de clasificación. Puesto que  $M$  independientes clasificaciones de al menos  $N$  soluciones (Cuando todos los miembros de una población en una frontera  $l$ ) están involucrados, el algoritmo anterior tiene una complejidad de  $O(MN \log N)$ .

Después de que todos los miembros de la población  $I$  son asignados a una distancia métrica, se puede compara dos soluciones por su proximidad con otras más. Una solución con el valor pequeño de la distancia está mas amontonada por otra soluciones. Esto el  $I$  que hace el operador de amontonamiento, el cual se describe a continuación.

### Operador amontonamiento

El operador de amontonamiento conduce al proceso de selección en varios estados del algoritmo a un esparcimiento continuo en la frontera óptima de Pareto. Suponiendo que cada individuo  $i$  en la población tiene dos atributos

1. Rango de no dominancia ( $i_{rang}$ )
2. distancia de amontonamiento  $i_{dist}$

Se define a un orden parcial como

$$i \prec_n j \text{ si } (i_{rang} < j_{rang}) \text{ o } \\ ((i_{rang} = j_{rang}) \text{ y } (i_{dist} > j_{dist}))$$

Lo que significa que entre dos distancias con diferente rango de no dominancia se prefiere a la solución con menor rango (mejor), entonces se prefiere a la que está localizada en una región de amontonamiento menor.

### Inicio del algoritmo

Inicialmente, se crea una población aleatoria  $P_0$ . La población es clasificada con base a la no dominancia. A cada solución se le asigna una medida de adaptación ( o ranking) igual a su nivel de no dominancia ( 1 si está en el mejor nivel, 2 en el siguiente mejor nivel, y así). De esta manera la minimización de la adaptación es supuesta. En principio, se usan los operadores de selección de torneo binario, recombinación y mutación para crear una población de descendiente  $Q_0$  de tamaño  $N$  . Puesto que el elitismo es introducido por medio de comparar la población actual con la anterior encontrada de entre las mejores soluciones no dominadas, el procedimiento es diferente después de la generación inicial. Abajo se describirá la  $t_{ésima}$  generación del algoritmo propuesto.

$R_t = P_t \cup Q_t$	Combina padres y descendencia
$F = \text{sorteo de no dominancia } (R_t)$	$F = (F_1, F_2, \dots)$ Todas las fronteras no dominadas de $(R_t)$ .
$P_{t+1} = 0 \text{ e } i = 1$ Hasta que $ P_{t+1}  +  F_i  \leq N$	Hasta que población sea igual a N.
$(F_i)$	Calculo de la distancia de amontonamiento en $(F_i)$ .
$P_{t+1} = P_{t+1} \cup F_i$	Se incluye la $i$ -ésima frontera no dominada en la población padre
$i = i + 1$	Comprueba la incursión de la próxima frontera.
$\text{Sort}(F_i, \prec_n)$	Sorteo en la descendencia usando $\prec_n$ comparador de amontonamiento

$$P_{t+1} = P_{t+1} \cup F_i [1 : (N - |P_{t+1}|)]$$

Escoge a los primeros elementos de  $(N - |P_{t+1}|)$  de  $F_i$

$$Q_{t+1} = crear(P_{t+1})$$

Se usa la selección, cruce y mutación para generar un nueva población  $Q_{t+1}$

$$t = t + 1$$

Primero, se forma una población combinada  $R_t = P_t \cup Q_t$ . La población  $R_t$  es de tamaño  $2N$ . Entonces la población  $R_t$  es clasificada de acuerdo a la no dominancia. Puesto que todos los miembros de las poblaciones previas y actuales están incluidos en  $R_t$  el elitismo está asegurado. Ahora las soluciones pertenecientes al mejor conjunto  $F_1$  no dominado son la mejor solución en la población combinada y debe ser enfatizado más que cualquier otra solución en la población combinada. Si el tamaño de  $F_1$  es menor que  $N$ , definitivamente se eligen a todos los miembros del conjunto  $F_1$  para la nueva población  $P_{t+1}$ . Los miembros sobrantes de la población  $P_{t+1}$  son elegidos para subsecuentes fronteras no dominadas para su ranqueo. Así se eligen las soluciones del conjunto  $F_2$  y  $F_3$ . Este procedimiento continua hasta que ya no se puedan acomodar más conjuntos. Se dice que  $F_1$  es el último conjunto no dominado más allá que cualquier otro conjunto pueda ser acomodado. En general, la cantidad de soluciones de todos los conjuntos desde  $F_1$  hasta  $F_i$  será tan grande como el tamaño de la población. Para seleccionar exactamente  $N$  miembros de la población se clasifica la soluciones de última frontera  $F_i$  usando el operador de comparación de amontonamiento  $\prec_n$  en orden descendente y se elige a la mejor selección requerida para llenar las ranuras de todas las poblaciones. El procedimiento se muestra en la figura 2

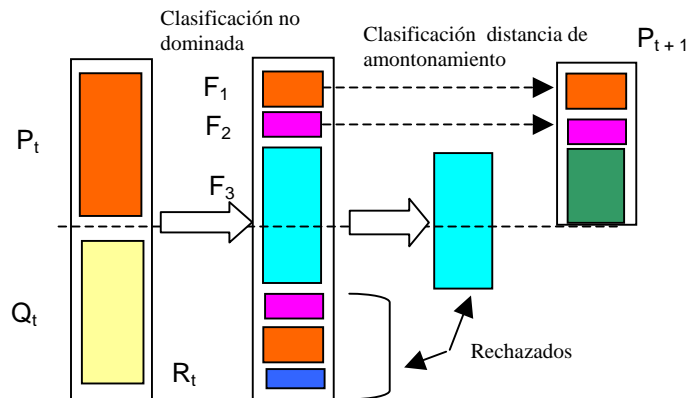


Figura B2 Esquema del procedimiento de NSGA2

La nueva población  $P_{t+1}$  de tamaño  $N$  es usada para la selección, cruza y mutación que formará a la nueva población  $Q_{t+1}$  de tamaño  $N$ . Es importante notar que se utiliza un torneo binario como operador de selección, pero el criterio de selección está basado en el operador de comparación de amontonamiento  $\prec_n$ . Puesto que este operador requiere el ranking y la distancia de amontonamiento para cada solución en la población, se calcula esa cantidad mientras se forma la población  $P_{t+1}$ .

Considerando la complejidad de un iteración en el algoritmo. Las operaciones básicas en el peor de los casos de complejidad son las siguientes.

1. El sorteo no dominado es  $O(M(2N)^2)$ ;
2. La asignación de la distancia de amontonamiento es  $O(M2N)\log(2N)$ ;
3. El sorteo en  $\prec_n$  es  $O(2N\log(2N))$ ;

La complejidad total del algoritmo es  $O(MN^2)$ , la cual es gobernada por el sorteo de no dominancia. Si el algoritmo se ejecuta con cuidado, el tamaño de la población para ser dominada de acuerdo al sorteo de no dominancia es  $2N$ . En cuanto el procedimiento ha encontrado suficientes fronteras para tener  $N$  miembros en  $P_{t+1}$  no hay razón para continuar con el procedimiento de selección.

La diversidad entre las soluciones no dominadas se da por un procedimiento de comparación usando la distancia de amontonamiento, la cual es usada durante el torneo de selección y durante la fase de reducción de la población. Puesto que las soluciones relacionadas con la distancia de amontonamiento (una medida de la densidad de soluciones en un vecindario), no se necesita un parámetro extra. Aunque la distancia de amontonamiento es calculada en el espacio de las funciones objetivo, esto también puede ser implementado en el espacio paramétrico, si así se desea.



---

**Bibliografía**

- Ahmad Nafis 2001 “Concurrent trends in computer aided process planning”. Proceeding of the 7 International Conference of the Institute of Engineers. Bangladesh, October 2001 pp 91 – 92.
- Alam, M, R., Lee, K. Rahman, M. 2003 “Process planning optimization for the manufacture of injection mould using a genetic algorithm”, International Journal of Computer Integrated Manufacturing, Vol. 16 No 3, pp. 181-191
- Alting, L. and Zhang, H. 1989 “Computer aided process planning: the state of art”, International Journal of Production Research, vol. 27, no. 4 pp 553-585.
- Arezoo, B., Ridgway, K., and Ahmari, A. 2000 “Selection of cutting tool and conditions of machining operation using an expert system”, Computer in Industry, Vol. 42 No. 1, pp. 43 - 58.
- ASTME (American Society of Tool and Manufacturing Engineering) “Tool engineers handbook”. Mc GrawHil 1984 USA.
- Atanasios Papavasiliu and Emil Gegov 2002. “CAD and CIM systems: state of the art and development trends”. Annual of the University of mining and geology "St. Ivan Rilski" vol.44-45, part III, Mechanization, electrification and automation in mines, Sofia, 2002, pp. 67-69
- Atmani, A. and R. S. Lashkari 1998 “A model of machine-tool selection and operation allocation in FMS” International Journal of Production Research, vol. 36, no. 5, 1339 - 1349
- Bachman, R. J., Levesque, H. J., and Reiter, R., editors (1991), “Artificial Intelligence”, Special Volume on Knowledge Representation, Volume 49.
- Bishop, M. C. “Neural Network for pattern recognition”. Claredon Press, Oxford 1995 USA.
- Boonserm K., Richard A., Hyumbo C., Jones, A. 2004. “Integration framework of process planning based on resource independent operation summary to support collaborative manufacturing”, International Journal of Computer Integrated Manufacturing, Vol. 17 No.5, pp. 377 –393.
- Borja, V. 1997. “Redesign support by data models with particular reference to reverse engineering”, PhD Thesis, (Loughboroug, England: Loughboroug University of Technology)

- Borja, V., Bell, R., Harding, J.A. 2001. "Assisting design for manufacture using the data model driven approach", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B, Vol. 215 No. B12, pp. 1757-1772.
- Brio, B. Martín del, A. Sanz Molina; "Redes neuronales y sistemas borrosos", edit: Ra-ma 1997
- Convener, Nell 1998, "Enterprise representation: An analysis of standards issues", National Institute of Standards and Technology 1 301 975 5748
- Cagdas M., B. Catay and E. Budak 2004 " A decision support system for machine tool selection" Journal of Manufacturing Technology Management, Vol. 15, No. 1, pp. 101 – 109.
- Chang, Teng-ping and Chang Chia-hua 2000. "An integrated artificial intelligent computer-aided process planning", International Journal of Computer Integrated Manufacturing, Vol. 13 No. 6, pp. 483 – 497.
- Chen, M.C. 2004 "Optimizing machining economics models for turning operation using scatter search approach", International Journal of Production Research, Vol. 42 No. 13, pp. 2611-2625.
- David Chen and Francois Vernadat, 2004. "Standards on enterprise integration and engineering-state of the art", International Journal of Computer Integrated Manufacturing, Vol. 17 No. 3, pp. 235 –253.
- Davis, L.."Handbook of Genetic Algorithms", Van Nostrand Reinhold, 1991, USA.
- Deb, Kalyanmoy 2005 "Practical optimization using evolutionary algorithm methods" Kanpur Genetic Algorithms Laboratory, Indian Institute of technology. Technical report 2005008.
- Deb, K., L. Thiele, M. Laumanns, and E. Zitzler, 2001, "Scalable test problems for evolutionary multi-objective optimization", Computer Engineering and Networks Laboratory Report (TIK-112), Department of Electrical Engineering, Swiss Federal Institute of Technology, Zurich, Switzerland.
- Deb, Kalyanmoy "Multi-objective optimization using evolutionary algorithms", John Wiley and Sons Ltd, 2002.
- Deb, Kalyanmoy, S. Agraw, A. Pratap, T. Meyarivan 2002. "A Fast an elitist multi-objective genetic algorithm: NSGA-II" IEEE Transactions on Evolutionary Computation, Vol. 60 No. 2, 182-197.
- Dereli, T. Filis IH., Sonmez Ai., 1997 "An integrated approach for simultaneous determination of optimum cutting parameters and tools in process planning", Proceeding of the 22<sup>nd</sup> International Conference on Computer and Industrial Engineering, December 20 –22 1997, Cairo Egypt, pp. 41-43.

- Dereli, T. Baykasoglu, A. 2005 "OPPS-PRI 2.0: an open and optimized process planning system for prismatic parts to improve the performance of SMEs in the machining industry" International Journal of Production Research, Vol.43 ,No.5,1 March 2005, pp. 1039-1087.
- Devireddy, R. 1999. "Feature – based modeling and neural networks – based CAPP for integrated manufacturing", International Journal of Computer Integrated Manufacturing, Vol. 12 No. 1, pp. 61 – 74.
- Dorador, J. M, and Young, R.I.M, 2000. "Application of IDEF0, IDEF and UML methodologies in the creation of information models", International Journal of Computer Integrated Manufacturing, Vol. 13 No. 5, pp. 430-445.
- Durkin, J. (1994), "Expert Systems: Design and Development". Maxwell Macmillan, New York.
- Fox, Mark. Gruninger, M. "Enterprise modelling". American association for artificial intelligence 1998. California USA
- Freeman, J. A. and Skapura, D. M. (1991), "Neural Networks: Algorithms, applications, and programming techniques". Addison-Wesley, Reading, MA.
- Gregory J. E. Rawlins; "Foundation of genetic algorithms", Morgan Kauffmann Publishers Inc.1991.
- Goldberg, D. E.; "Genetic algorithms in search, optimizations and machine learning", Addison-Wesley 1989.
- Gonzáles. F. and P. Rasado 2004 "General information model for representing machining features in CAPP systems" International Journal of Production Research, vol. 42, no. 9, 1815 – 1842.
- Gopalakrishnan, B., T. Yoshii and S.M. Dappili 2004 " Decision support system for machining center selection", Journal of Manufacturing Technology Management, Vol. 15, No. 2, pp. 144 - 154
- Gorczyca, E. F. "Application of metal cutting theory", Industrial press inc.1987 New York USA.
- Hascoet J, K., Venís F., Risarcher P.,1996 "Choice of machine tool configuration", IDMME 96, pp. 395-404, pp 15-17 1996 Ecole Centrale de Nantes Primeca.
- Hasmi, K., Baradie, M.A. 1998 "Fuzzy logic based intelligent selection of machining parameters", Computer and Industrial Engineering, Vol.35 No 3 and 4, pp. 571-574.
- Huang S. H, and Zhang H. C 1995 "Neural expert hybrid approach for intelligent manufacturing: A survey". Computer in Industry vol. 22 pp 107 - 126

- I.S. Jawahir, A. K. Balaji, K. E. Rouch. 2003. "Towards integration of hybrid models for optimized machining performance in intelligent manufacturing systems", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 139 No 1, pp. 488–498.
- Ivanenko S., Makhanov S., Munlin M. , 2004. "New numerical algorithms to optimize cutting operations of a five-axis milling machine", *Applied Numerical Mathematics*, Vol. 49 No 2004, pp. 395–413.
- Joo, Jaekoo 2000 "A conceptual framework and design architectures for neural network-based adaptive and dynamic process planning". PhD Thesis, Pohang University of Science and Technology Korea.
- Liang Ding, Young Yue, Kemal Ahmer, Mike Jackson y Robert Paking, 2005 "Global optimization of a feature-based process sequence using GA and ANN techniques" *International Journal of Production Research*, Vol. 43, No. 15, pp 3247–3272
- Kalpakjians, S. 1997. "Process for engineering materials" 3er Edition Addison Wesley USA.
- Kalpakjians, S. 1995 "Manufacturing engineering and technology". Addison Wesley USA.
- Keges, J. "Handbook of expert system in manufacturing", 1991 Mc GrawHijj USA
- King, Robert. "Computational Intelligence in Control Engineering", Marcel Deeker Inc 1999, NY USA.
- Kimbler,D 1997 "IDEF0 lecture notes" No.4.  
<http://taylor.ces.clemenson.edu/ie340/files/340-4.htm>
- Kosanke, K (1996) "CIMOSA Overview and status". *Computer in Industry*, No. 27 pp. 101-109.
- Kristen Bell De Tienne 2003 "Artificial neural networks for the management researcher: The state of the art". Department of Organizational Leadership and Strategy. Marriott School of Management, Brigham Young University.
- Lioneli, R., Otto, S., Paris, H. 2003. "Process planning as an integration of knowledge in the detailed design phase", *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*. Vol. 16 No. 14, pp. 27-37.
- Liu, S. and Young, R.I.M. 2004. "Utilizing information and knowledge models to support global manufacturing co-ordination decisions", *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*. Vol. 17 No. 6, pp. 479-492.
- M.-C.Chen, 2004. "Optimizing machining economics models of turning operations using the scatter search approach", *International Journal of Production Research*. Vol. 42 No. 12, pp. 2611 –2625.

- Iwatu. I. M 1996 "Optimization of machining parameters with consideration of tool adjustment in turning operations". Thesis of Ottawa Carleton Institute for mechanical and aerospace engineering. University of Ottawa, Ottawa, Ontario, Canada.
- Mitsubishi, "Herramientas de carburo para corte de meta". 2004, México
- Molina, A 1995. "A manufacturing model to support data-driven applications for design and manufacture", PhD Thesis, Loughboroug, England: Loughboroug University of Technology.
- Molina, A. and Bell, R 1999. "A manufacturing model representation of a flexible manufacturing facility", Proc Instn Mechanical Engineers Part B 213, pp. 225 - 246
- Morano, H., Borja, V., López, M., Ayala, A. (2003). "Data model support to assist the concurrent design of injection plastic parts and their moulds", (DETC2003/CIE48226) Conference Proceedings: DETC'03, Design engineering technical conference and computers and information in engineering conference, American Society of Mechanical Engineers, September, Chicago, Illinois, E.U.A.
- Morales K. Casas G, "Algoritmos genéticos", Fondo de cultura económica, 2002 México.
- MOSES 2003. " Manufacturing model and product model" .  
[http://eva.leed.ac.uk/www\\_moses](http://eva.leed.ac.uk/www_moses)
- MOSES R.g 1997. MOSES: "Manufacturing model and product model", Technical report, Loughborough University.
- Mursec, B., Cus, F. 2003, "Integral model of selection of optimal cutting condition from different databases of tool makers", Journal of Material Proceeding Technology, Vol. 133 No. 1, pp. 158-165.
- Noori, H. Radford, R. "On companion to production and operation management". 1995 Mc GrawHill USA.
- Oberg, E. "Machinery handbook". 2004 Industrial press. N.Y. USA
- Olmeda, I. S. Barba-Romero; "Redes neuronales artificiales", Universidad de Alcalá 1993.
- Osyczka A. "Multi criterion optimization in engineering". 1984 Ellis Horwood limited England.
- Rai, R. Kameshwaran, S. 2002. "Machine tool selection and operation allocation in FMS: solving a fuzzy goal programming model using a genetic algorithm", International Journal of Production Research, Vol. 40 No. 3, pp.641 – 665.
- Riveiro, M.V. Coppini, N.L 1999. "An applied database system for the optimization of cutting conditions and tool selection", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 92 No. 13, pp. 371-374.

- Ribeiro Filho, J.L.; Treleven, Ph.C., and Alippi, C., "Genetic-Algorithm Programming Environments", IEEE Computer, June 1994, pp. 28-43.
- Sandvik Coromant 1998, "Modern metal cutting: A practical handbook" , USA
- Sandvik CoroKey 2003, "Guía de selección", México
- Sandvik Coromant 2005, "Nuevas herramientas", México
- Sarauanan, R., Asokan, P 2003. "Machining parameter optimization for turning cylindrical stock into a continuous finished profile using genetic algorithm and simulated annealing", International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 21 No 1, pp. 1 – 9.
- Shaw C. F. and Eugene Y, S 2000 Information modeling of conceptual process planning integrate with conceptual design. 5<sup>th</sup> Design for Manufacturing Conference September 10-13.
- Shin, Y. and Joo, Y 1992 "Optimization of machining conditions with practical constraints", International Journal of Production Research, Vol.30 No. 3, 2907-2919.
- Simon, H . "NEural network: A comprehensive foundation", Mc Millan college publishing N.Y. USA.
- Somashekar, R. 2002 "Fixturing featured selection in featured - based system", Computers in industry, Vol. 48 No. 2, pp. 99 – 108.
- Smith, A. J. C++ desarrollo de proyectos, Thomson Learning, 2001 México.
- Srinivas, M., and Patnaik, L.M., 1994. "Genetic algorithms: A Survey", IEEE Computer, June 1994 , pp. 17-26.
- Suh, Nam Pyo, "Axiomatic design advances and applications", New York, Oxford, Oxford University, 2001.
- Sumitomo 2002, "Metal cutting handbook", USA
- Toh .K.T. 1999. "The realization of reference enterprise modeling architecture", International Journal of Computer Integrated Manufacturing, vol. 12 No. 5 pp 403 – 417
- Tarricabras, J. M. "Introducción a la lógica borrosa". Ariel, Barcelona 1995
- Von Altroct, C 1991. " Fuzzy logic and nuero fuzzy application". Prentice Hall USA
- Toli, B.M. Colosimo, Q. Semeraro, F. Jovanene 1977
- Annal of the CIRP Vol 46 No. 13 pp 411-414
- Usher, J., y Fernandez, K. 1999. "An object oriented application of tool selection in dynamic process planning", International Journal of Production Research, Vol. 34 No. 13, pp. 2879 – 2874.

- 
- W. D. Li, S.K.Ong, 2004. "Optimization of process plans using a constraint-based tabu search approach", *International Journal of Production Research*, Vol. 42 No. 10, pp. 1815 –1842.
  - Wang X. and I. S. Jawahir 2005 "Optimization of multi-pass turning operations using genetic algorithms for the selection of cutting conditions and cutting tools with tool-wear effect" *International Journal of Production Research*, Vol. 43, No. 17, pp 3543–3559
  - Wang, Y., Shaw, C. and Chen, Y. 2000. "Machine selection in flexible manufacturing cell: A fuzzy multiple attribute decision-making approach", *International Journal of Production Research*, Vol. 38 No. 9, pp. 2079-2097.
  - Whitley, L.D. (Editor), "Foundations of genetic algorithms 2", Morgan Kaufmann Publishers, 1993.
  - X.W.Xu, Q, He, 2004. "Striving for a total integration of CAD,CAPP,CAM and CNC", *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol. 20 No. 10, pp. 101-109.
  - Yong Yue, Lian Ding, Kemal Ahmet, John Painter and Mick Walters 2002. "Study of neural network techniques for computer integrated manufacturing". *Engineering Computations*, Vol. 19 No. 2, 2002, pp. 136-157.
  - Zhang Jin. "Theory and technique of precision cutting, Pergamon Press 1991 New York, USA.
  - Zitzler, E., K. Deb, and L. Thiele, 2000, "Comparison of multiobjective evolutionary algorithms: empirical results". *Evolutionary Computation*, Vol. 8 No. 2, 173-195.