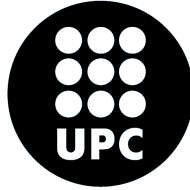


ADVERTIMENT. L'accés als continguts d'aquesta tesi doctoral i la seva utilització ha de respectar els drets de la persona autora. Pot ser utilitzada per a consulta o estudi personal, així com en activitats o materials d'investigació i docència en els termes establerts a l'art. 32 del Text Refós de la Llei de Propietat Intel·lectual (RDL 1/1996). Per altres utilitzacions es requereix l'autorització prèvia i expressa de la persona autora. En qualsevol cas, en la utilització dels seus continguts caldrà indicar de forma clara el nom i cognoms de la persona autora i el títol de la tesi doctoral. No s'autoritza la seva reproducció o altres formes d'explotació efectuades amb finalitats de lucre ni la seva comunicació pública des d'un lloc aliè al servei TDX. Tampoc s'autoritza la presentació del seu contingut en una finestra o marc aliè a TDX (framing). Aquesta reserva de drets afecta tant als continguts de la tesi com als seus resums i índexs.

ADVERTENCIA. El acceso a los contenidos de esta tesis doctoral y su utilización debe respetar los derechos de la persona autora. Puede ser utilizada para consulta o estudio personal, así como en actividades o materiales de investigación y docencia en los términos establecidos en el art. 32 del Texto Refundido de la Ley de Propiedad Intelectual (RDL 1/1996). Para otros usos se requiere la autorización previa y expresa de la persona autora. En cualquier caso, en la utilización de sus contenidos se deberá indicar de forma clara el nombre y apellidos de la persona autora y el título de la tesis doctoral. No se autoriza su reproducción u otras formas de explotación efectuadas con fines lucrativos ni su comunicación pública desde un sitio ajeno al servicio TDR. Tampoco se autoriza la presentación de su contenido en una ventana o marco ajeno a TDR (framing). Esta reserva de derechos afecta tanto al contenido de la tesis como a sus resúmenes e índices.

WARNING. Access to the contents of this doctoral thesis and its use must respect the rights of the author. It can be used for reference or private study, as well as research and learning activities or materials in the terms established by the 32nd article of the Spanish Consolidated Copyright Act (RDL 1/1996). Express and previous authorization of the author is required for any other uses. In any case, when using its content, full name of the author and title of the thesis must be clearly indicated. Reproduction or other forms of for profit use or public communication from outside TDX service is not allowed. Presentation of its content in a window or frame external to TDX (framing) is not authorized either. These rights affect both the content of the thesis and its abstracts and indexes.



Universitat Politècnica de Catalunya

Departament de Projectes d'Enginyeria

Programa de Doctorat

PROJECTES D'INNOVACIÓ TECNOLÒGICA
EN L'ENGINYERIA DE PRODUCTE I PROCÉS

Sistema Experto de Selección de Procesos No Convencionales para Corte de Chapa Metálica

Autor:
David CORTÉS SÁENZ

Directors:
Carles RIBA
Nelly GORDILLO
Joaquim LLOVERAS

2012

Universitat Politècnica de Catalunya

Departament de Projectes d'Enginyeria

Tesi Doctoral. Memòria

**Sistema Experto de Selección de Procesos
No Convencionales
para Corte de Chapa Metálica**

Autor: David Cortés Sáenz

Tesi presentada per obtenir el títol de Doctor per
la Universitat Politècnica de Catalunya

Programa de Doctorat
*“Projectes d'Innovació Tecnològica
en L'Enginyeria de Producte i Procés”*

Director: Dr. Carles Riba Romeva
Co-Directors: Dra. Nelly Gordillo Castillo
i Dr. Joaquim Lloveras Macià

2012

Resum

Els processos de tall han estat sota un constant canvi degut a la creixent necessitat de la indústria de desenvolupar productes finals amb caracterstiques òptimes que agil·litzin la seva introducció al mercat. Existeixen cents de processos diferents per aplicacions molt variades dels quals el tall de xapa metàl·lica en forma part. Dins dels processos de tall de xapa, es troben els processos de tall per làser, tall per xorro d'aigua, tall per plasma i oxtall entre d'altres, també coneguts com a processos de tall no convencionals. Aquests processos constantment han ampliat el seu camp d'aplicació essent cada vegada més utilitzats en materials amb major gruix, a velocitats de tall majors i millorant cada vegada més la qualitat del tall, col·locant-los com una per al excel·lent opció tall de xapa metàl·lica.

Part dels paràmetres d'operació relatius a aquests processos (p.e. les velocitats de tall, toleràncies requerides, gruixos al tallar i materials possibles de tallar), coincideixen entre un procés i altre en certs rangs de valors. Això podria interpretar-se de manera errònia si es creies que qualsevol procés dels anomenats abans poden ésser utilitzat sota les mateixes circumstàncies. Usualment, la elecció per d'un procés per a un disseny es realitza per mitjà d'una senzilla presa de decisió i basada en la pròpia experiència o el coneixement que es tingui. No obstant això escollir correctament un procés de tall es un factor clau per a la optimització de tot el procés productiu, ja que permet agilitzar el temps de fabricació i d'entrega d'un producte, disminuir elevats costos de fabricació, desperdici de materials i evitar operacions secundàries per manca de qualitat.

Degut a la complexitat dels diversos procediments per a la selecció de processos, be sigui matemàticament o per el coneixement previ que es tingui de cada procés, existeix encara la necessitat d'una eina de fàcil utilització que pugui emular el comportament que tindria un expert al seleccionar un procés de tall no convencional, una eina que permeti identificar els atributs i obtenir la

més apropiada combinació d'atributs en conjunció amb els requeriments reals de l'aplicació de maquinat.

Per a facilitar la presa de decisions en els processos de tall de xapa no convencionals, s'ha desenvolupat un sistema intel·ligent que utilitza un model de selecció basat en tècniques de lògica difusa, generat a partir de regles i una base de coneixement obtinguda del coneixement de diversos experts. A partir d'una senzilla captura de paràmetres d'una peça, el sistema ofereix les opcions de tall més apropiades en base als requeriments d'una peça, permeten a un usuari **no expert** la selecció del procés més adequat amb èmfasis en una prioritat predefinida: acabat, cost o temps, d'una manera quantitativament encertada.

Els resultats obtinguts dels diversos experiments realitzats indiquen que el sistema desenvolupat per a la selecció i comparació de processos de tall de xapa metàl·lica, compleix amb els requeriments necessaris per a ser utilitzat en la selecció dels processos de tall no convencionals. Aquesta Tesis presenta pas a pas una metodologia per a la selecció i comparació de processos de tall de xapa metàl·lica amb l'objectiu de proporcionar una nova manera de seleccionar processos per al tall de material per mitjà d'un sistema expert.

Resumen

Los procesos de corte han estado bajo un constante cambio debido a la creciente necesidad de la industria de desarrollar productos finales con características óptimas que agilicen su introducción al mercado. Existen cientos de procesos diferentes para aplicaciones muy variadas de los cuales el corte de chapa metálica forma parte. Dentro de los procesos de corte de chapa, se encuentran los procesos de corte por láser, corte por chorro de agua, corte por plasma y oxicorte entre otros, también conocidos como procesos de corte no convencionales. Estos procesos constantemente han ampliado su campo de aplicación siendo cada vez más utilizados en materiales con mayores espesores, a velocidades de corte mayores y mejorando cada vez más la calidad del corte, colocándolos como una excelente opción para el corte de chapa metálica.

Parte de los parámetros de operación relativos a estos procesos (p.e. las velocidades de corte, tolerancias requeridas, espesores a cortar y materiales posibles de cortar), coinciden entre un proceso y otro en ciertos rangos de valores. Esto podría interpretarse de manera errónea si se creyera que cualquier proceso de los antes mencionados puede ser utilizado bajo las mismas circunstancias. Usualmente, la elección de un proceso para un diseño se realiza por medio de una sencilla toma de decisión y basada en la propia experiencia o el conocimiento que se posea. Sin embargo, elegir correctamente un proceso de corte es un factor clave para la optimización de todo el proceso productivo, ya que permite agilizar el tiempo de fabricación y de entrega de un producto, disminuir elevados costes de fabricación, desperdicio de materiales y evitar operaciones secundarias por falta de calidad.

Debido a la complejidad de los diversos procedimientos para la selección de procesos, bien sea matemáticamente o por el conocimiento previo que se tenga de cada proceso, existe aún la necesidad de una herramienta de fácil utilización que pueda emular el comportamiento que tendría un experto al seleccionar un proceso de corte no convencional, una herramienta que permita identificar los

atributos y obtener la más apropiada combinación de atributos en conjunción con los requerimientos reales de la aplicación de maquinado.

Para facilitar la toma de decisiones en los procesos de corte de chapa no convencionales, se ha desarrollado un sistema inteligente que utiliza un modelo de selección basado en técnicas de lógica difusa, generado a partir de reglas y una base de conocimiento obtenida del conocimiento de diversos expertos. A partir de una sencilla captura de los parámetros de una pieza, el sistema ofrece las opciones de corte más apropiadas en base a los requerimientos de una pieza, permitiendo a un usuario **no experto** la selección del proceso más adecuado con énfasis en una prioridad predefinida: acabado, coste o tiempo, de una manera cuantitativamente acertada.

Los resultados obtenidos de los diversos experimentos realizados indican que el sistema desarrollado para la selección y comparación de procesos de corte de chapa metálica, cumple con los requerimientos necesarios para ser utilizado en la selección de los procesos de corte no convencionales. Esta Tesis presenta paso a paso una metodología para la selección y comparación de procesos de corte de chapa metálica con el objetivo de proporcionar una nueva manera de seleccionar procesos para el corte de materiales por medio de un sistema experto.

Abstract

Cutting processes have been under a constant change due to the increasing necessity of the industry to develop end items with optimal characteristics that make agile their introduction to the market. Sheet metal cutting is part of a group of hundreds of different processes for various applications. Within the sheet metal cutting processes are laser cutting, water jet cutting, plasma and oxyfuel cutting among others, also known as non-conventional cutting processes. These processes have continuously extended their field of application being increasingly used with thicker materials, higher cutting speeds and better cutting quality, placing them as an excellent option for cutting sheet metal.

Part of the operating parameters for these processes (eg cutting speed, required tolerances, thicknesses and materials to be cut) overlap between one process and another in certain ranges. This could be misinterpreted if it is believed that any of the above process can be used under the same circumstances. Frequently, the selection of a cutting process is done through a simple decision-making and it is based on the experience or previous knowledge. However, choosing the right cutting process is a key factor for the optimization of the entire production process, it allows faster time to manufacturing and product delivery, reduces high manufacturing costs, material waste and avoids secondary operations for lack of quality.

Due to the complexity of the various procedures for the selection process, either mathematically or by prior knowledge on each process, there exists the need of an user-friendly tool that can emulate the behavior that an expert would have when selecting a non-conventional cutting process, a tool capable of identifying the attributes and get the most appropriate combination of attributes in conjunction with the actual requirements of the machining application.

In order to facilitate the decision-making of non-conventional sheet metal cutting processes, it is presented an intelligent system that uses a selection mo-

del based on fuzzy logic techniques. The model is generated from a knowledge base acquired from diverse experts. With a simple input of the parameters of a piece, the system offers the most appropriate cutting options based on the requirements of a piece, allowing a **non-expert** user selecting the most appropriate process (quantitatively accurate) with emphasis on a predefined priority: finish, cost or time.

The results of different experiments show that the presented system for the selection and comparison of sheet metal cutting processes, meets the requirements for its use in the selection of non-conventional cutting processes. This thesis presents a step by step methodology for the selection and comparison of sheet metal cutting processes as a new structure of selection by means of an expert system.

Agradecimientos

Debo agradecer por su apoyo para el desarrollo y culminación de esta tesis a aquellas personas que han tenido una influencia favorable en mí durante este período:

Primeramente a Dios por darme la oportunidad de alcanzar esta etapa en mi vida, por las experiencias que han surgido durante este tiempo y por los medios que ha dispuesto para ello.

A mi esposa Nelly quien ha estado siempre a mi lado, dándome todo su apoyo, consejos y quien constantemente se ha esforzado por ayudarme a ser una mejor persona.

A mis hijos David, Michel y Natalia, porque me han dado fuerzas y ánimo.

A los profesores que me han apoyado durante la realización de esta tesis, al Doctor Carles Riba Romeva, por compartirme el deseo de investigar en este tema, al Doctor Joaquín Lloveras Macía, por la guía dada durante este proceso y a la Doctora Nelly Gordillo Castillo por la dirección técnica en el desarrollo de esta tesis.

También deseo agradecer a mis padres por los valores inculcados, porque siempre nos apoyaron para dedicar tiempo a los estudios.

Agradezco también al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología CONACYT de México, por la beca otorgada número 206436 para la realización de este Doctorado.

Y a todos los amigos que tuvimos en Barcelona, en especial en Terrassa ya que formaron parte de nuestras vidas, por su amistad desinteresada y su apoyo.

*En memoria de nuestro amigo
David Caballero*

“El hombre sabio es fuerte, y el hombre de conocimiento aumenta su poder”.

Proverbios 24:5

Índice general

1. Resumen de la Tesis	1
1.1. Introducción	1
1.2. Objetivo General	5
1.2.1. Objetivos Específicos	5
1.3. Metodología del Desarrollo de la Tesis	5
1.4. Contenido de la Tesis	6
1.5. Contribuciones de la Tesis	8
1.6. Publicaciones Derivadas de la Tesis	8
2. Tecnologías de Corte	
No Convencionales	11
2.1. Introducción	11
2.2. Resumen del Capítulo	13
2.3. Corte por Chorro de Agua	14
2.3.1. Componentes Básicos y Principio de Operación	15
2.3.2. Tipos de Corte por Chorro de Agua	16
2.3.3. Características del Corte por Chorro de Agua	18
2.4. Corte por Láser	21
2.4.1. Componentes Básicos y Principio de Operación	22
2.4.2. Tipos de Corte por Láser	27
2.4.3. Características del Corte por Láser	29
2.5. Oxicorte	30
2.5.1. Componentes Básicos y Principio de Operación	32
2.5.2. Características del Oxicorte	34
2.6. Corte por Plasma	38
2.6.1. Componentes Básicos y Principio de Operación	39
2.6.2. Tipos de Corte por Plasma	40
2.6.3. Características del Corte por Plasma	42
2.7. Tabla Comparativa de Procesos de Corte	45

2.8. Conclusiones del Capítulo	45
3. Metodologías para la Selección de Procesos de Fabricación	51
3.1. Introducción	51
3.2. Resumen del Capítulo	52
3.3. Mapas de Información de Procesos	
PRIMAs	52
3.3.1. Selección de Procesos por PRIMAs.	54
3.3.2. Revisión de Metodología PRIMA	54
3.4. Metodología de Selección de Ashby.	57
3.4.1. Diagramas de Selección	59
3.4.2. Revisión de Metodología Ashby	61
3.5. Selección General de Procesos de	
Producción de Halevi	62
3.5.1. Parámetros de Selección de Procesos de	
Manufactura	63
3.5.2. Preselección de Procesos	64
3.5.3. Matrices de Solución	65
3.6. Proceso de Selección de Manufactura	
de Dieter	65
3.7. Métodos de Evaluación Multi Criterio.	68
3.7.1. Topsis	69
3.7.2. AHP	69
3.8. Calculadoras de Corte En Línea	70
3.8.1. Calculadora KMT	71
3.8.2. Calculadora de Corte por Láser PRC	72
3.8.3. Calculadora para Corte por Láser SYNRAD	73
3.8.4. Revisión de Calculadoras En Línea	73
3.9. Líneas de Investigación en la Selección de Procesos No Conven-	
cionales	74
3.10. Externalización del Proceso de Selección	74
3.10.1. Revisión de los Centros de Investigación	76
3.11. Conclusiones del Capítulo	77
4. Inteligencia Computacional	83
4.1. Introducción	83
4.2. Resumen del Capítulo	84
4.3. Algoritmos Genéticos	84
4.3.1. Historia de los Algoritmos Genéticos	85
4.3.2. Operadores Genéticos	86
4.3.3. Ventajas, Limitaciones y Aplicaciones de AG	88

4.4.	Redes Neuronales Artificiales	91
4.4.1.	Historia de las Redes Neuronales Artificiales	91
4.4.2.	Funcionamiento de las RNAs	92
4.4.3.	Características de una RNA	93
4.4.4.	Analogía de Funcionamiento de una Red Neuronal	94
4.4.5.	Tipos de Redes Neuronales	95
4.5.	Lógica Difusa	101
4.6.	Sistemas Híbridos	101
4.6.1.	Ejemplos de Sistemas Híbridos	102
4.7.	Aplicaciones de Inteligencia Computacional en los Procesos de Selección	104
4.8.	Conclusiones	106
5.	Lógica Difusa	111
5.1.	Introducción	111
5.2.	Resumen del Capítulo	112
5.3.	Antecedentes	112
5.4.	Conjuntos Difusos	113
5.5.	Variable Lingüística	114
5.6.	Grados de Pertenencia	114
5.7.	Funciones de Pertenencia	115
5.7.1.	Función de Pertenencia Triangular	115
5.7.2.	Función de Pertenencia Trapezoidal	117
5.7.3.	Función de Pertenencia Gaussiana	118
5.7.4.	Función de Pertenencia Gaussiana Doble	119
5.7.5.	Función de Pertenencia de Campana	121
5.7.6.	Función de Pertenencia S	122
5.7.7.	Función de Pertenencia Z	123
5.7.8.	Función de Pertenencia Pi	124
5.7.9.	Función de Pertenencia Sigmoidal	125
5.7.10.	Funciones de Pertenencia <i>Singleton</i> o Punto Borroso	126
5.8.	Funciones de Agregación	126
6.	Sistema Experto para la Selección de Procesos de Corte No Convencionales	131
6.1.	Introducción	131
6.2.	Resumen del Capítulo	133
6.3.	Esquema General del Modelo de Selección	133
6.4.	Algoritmos Base para la Medición de Atributos	135
6.4.1.	Algoritmo de Capacidad	135
6.4.2.	Algoritmo de Velocidad	138

6.4.3.	Algoritmo de Complejidad	140
6.4.4.	Algoritmo de Tolerancia	144
6.5.	Selección de Procesos por Prioridad	146
6.5.1.	Prioridad Tiempo	148
6.5.2.	Prioridad Acabado	148
6.5.3.	Prioridad Coste	149
6.5.4.	Prioridad Proceso	150
6.6.	Conclusiones del Capítulo	150
7.	Experimentos y Resultados	153
7.1.	Introducción	153
7.2.	Resumen del Capítulo	154
7.3.	Primer Enfoque: Selección Experto Vs. Sistema	154
7.3.1.	Ejemplo de Aplicación	154
7.3.2.	Modificando la Prioridad	158
7.3.3.	Otros Experimentos	159
7.4.	Segundo Enfoque: Comparación Entre Procesos	162
7.4.1.	Ejemplo de Aplicación	162
7.5.	Tercer Enfoque: Análisis de Requerimientos	165
7.5.1.	Ejemplo de Aplicación	165
7.6.	Conclusiones del Capítulo	169
8.	Conclusiones y Futuras Líneas de Investigación	173
8.1.	Conclusiones	173
8.1.1.	Tecnologías de Corte No Convencionales	174
8.1.2.	Metodologías para la Selección de Procesos de Fabricación	174
8.1.3.	Inteligencia Computacional	175
8.1.4.	Lógica Difusa	175
8.1.5.	Sistema Experto para la Selección de Procesos de Corte No Convencionales	175
8.1.6.	Experimentos y Resultados	176
8.2.	Futuras Líneas de Investigación	176
A.	MCPS: Manual de Usuario	179
A.1.	Introducción	179
A.2.	Objetivo del Manual	179
A.3.	Especificaciones Técnicas	179
A.4.	Inicio del Sistema	180
A.5.	Uso del Sistema	180
A.5.1.	Opciones del Menú	180
A.6.	Proyecto Nuevo	181
A.7.	Selección de Parámetros	182

A.8. Resultados	187
A.8.1. Resultados Basados en las Prioridades	187
A.8.2. Resultados Basados en el Proceso	188
A.9. Guardar un Proyecto	188
A.10. Abrir un Proyecto Guardado	190
A.11. Imprimir Resultados	190
A.12. Edición de Base de Conocimiento	193
A.12.1. Función de Pertenencia	195
A.12.2. Tolerancias	195
A.12.3. Costes	195

Índice de figuras

2.1. Procesos de corte no convencionales.	12
2.2. Configuración básica de un sistema de corte por chorro de agua.	15
2.3. Corte por chorro de agua más abrasivo.	18
2.4. Calidades de corte por chorro de agua.	21
2.5. Espectro electromagnético.	23
2.6. Esquema del funcionamiento de corte por láser.	24
2.7. Sistema de corte por láser de CO_2	25
2.8. Configuración simple de oxicorte.	31
2.9. Ranura de corte o <i>kerf</i>	32
2.10. Principio de operación del oxicorte.	33
2.11. Técnica de oxicorte correcta.	36
2.12. Velocidad de oxicorte muy baja.	36
2.13. Velocidad de oxicorte muy elevada.	37
2.14. Boquilla de oxicortes demasiado lejos.	37
2.15. Boquilla de oxicorte demasiado cerca.	37
2.16. Exceso de oxígeno en el oxicorte.	38
2.17. Oxicorte con flama de precalentamiento excesiva.	38
2.18. Boquilla de oxicorte sucia.	38
2.19. Corte por plasma.	40
2.20. Corte por plasma.	41
3.1. Diagrama general del proceso de selección de la metodología PRIMA.	53
3.2. Esquema de la metodología de Ashby para la selección de procesos.	57
3.3. Diferentes Familias de procesos y sus derivaciones.	58
3.4. Expansión del Universo de procesos. Ejemplo de proceso de Unión.	59
3.5. Diagrama de flujo de selección de material y proceso.	60
3.6. Matriz Proceso-Forma	61
3.7. Diagrama de espesor de Ashby.	62
3.8. Esquema del Proceso de Diseño utilizado por Dieter.	68

3.9. Calculadora KMT.	71
3.10. PRC Calculadora Láser.	72
3.11. Resultados sugeridos por la calculadora láser de PRC.	72
3.12. Calculadora de corte para Láser SYNRAD.	73
3.13. Matriz de Calidad QFD para procesos no convencionales.	75
3.14. Metodología propuesta para un centro I+D.	76
4.1. Representación gráfica de un algoritmo genético.	85
4.2. Ejemplo de operador de selección tipo ruleta.	87
4.3. Estructura de una neurona biológica.	94
4.4. Arquitectura de una RN ADALINE.	97
4.5. Arquitectura de una Memoria Asociativa Bidireccional.	98
4.6. Arquitectura de una RNA de Función de Base Radial (RBF).	99
4.7. Red Neuronal Multicapa controlada por lógica difusa.	103
4.8. Redes Neuronales basadas en el Algoritmo Genético.	104
5.1. Representación gráfica de grados de pertenencia.	115
5.2. Función de pertenencia triangular.	116
5.3. Función de pertenencia trapezoidal.	118
5.4. Función de pertenencia Gaussiana.	119
5.5. Función de pertenencia Gaussiana doble.	120
5.6. Funciones de pertenencia Campana.	121
5.7. Funciones de pertenencia S.	122
5.8. Funciones de pertenencia Z.	123
5.9. Funciones de pertenencia Pi.	124
5.10. Funciones de pertenencia Sigmoidales.	125
5.11. Funciones de pertenencia Singleton.	126
6.1. Esquema general del modelo de selección.	134
6.2. Representación gráfica de las funciones de pertenencia trapezoidales para un material m dado.	137
6.3. Funciones de pertenencia trapezoidales para definir la complejidad en función del número de ángulos.	142
6.4. Funciones de pertenencia trapezoidales para definir la complejidad en función del número de perforaciones.	143
6.5. Recta numérica para definir la complejidad total de una pieza.	143
7.1. Mecanismo Fabricado para tren de Lavado.	155
7.2. Dimensiones generales de la pieza de lavado.	155
7.3. Pantalla principal para introducir parámetros de corte.	156
7.4. Pantalla principal del software mostrando la imagen de una pieza.	157

7.5. Resultados de selección de procesos para la pieza Girbau con prioridad en el acabado.	157
7.6. Resultados de selección de procesos con prioridad en el tiempo.	158
7.7. Grados de pertenencia de acuerdo al requerimiento de coste.	159
7.8. Resultados de selección basados en procesos.	160
7.9. Resultados de selección para la pieza Messer con tiempo como prioridad	163
7.10. Resultados de selección para la pieza Messer con prioridad acabado.	164
7.11. Resultados de selección para la pieza Messer con prioridad coste.	164
7.12. Pieza Hexagonal de Titanio de 2 <i>mm</i> de espesor.	165
7.13. Información entrante para pieza de Titanio de 2 <i>mm</i>	166
7.14. Resultados del análisis por proceso para el corte por láser.	167
7.15. Resultados del análisis por proceso para el corte por chorro de agua.	168
7.16. Ejemplo de información técnica del proceso de corte por láser.	168
7.17. Video de Soporte para la MSPC.	169
A.1. Ícono del Sistema MCPS.	180
A.2. Pantalla principal del Sistema MCPS	181
A.3. Menú Archivo	182
A.4. Menú Editar	182
A.5. Procedimiento para crear un nuevo proyecto.	182
A.6. Pantalla para captura de datos.	183
A.7. Procedimiento para abrir la imagen de la pieza.	183
A.8. Procedimiento para seleccionar el material.	184
A.9. Procedimiento para seleccionar el espesor.	184
A.10. Procedimiento para selección de número de perforaciones.	185
A.11. Procedimiento para selección de número de ángulos.	185
A.12. Procedimiento para la selección de prioridades.	186
A.13. Procedimiento para mostrar los resultados de selección.	186
A.14. Resultados de selección basados en prioridades.	187
A.15. Resultados de selección basados en procesos.	188
A.16. Pantalla de la descripción técnica de un proceso.	189
A.17. Procedimiento para mostrar video explicativo.	189
A.18. Procedimiento para guardar un proyecto.	190
A.19. Ventana de diálogo para guardar un proyecto.	191
A.20. Procedimiento para abrir un proyecto guardado.	191
A.21. Ventana de diálogo para abrir un proyecto guardado.	192
A.22. Recuperación de datos del proyecto.	192
A.23. Procedimiento para imprimir gráficos.	193

A.24.Impresión desde pantalla de procesos.	193
A.25.Procedimiento para editar base de conocimiento.	193
A.26.Alerta en la edición de base de conocimiento.	194
A.27.Opciones de edición en la base de conocimiento.	194
A.28.Edición de tolerancias para diversos procesos.	195
A.29.Edición de los costes de proceso por hora.	196

Índice de tablas

2.1. Diversos Tipos de Corte por Láser.	27
2.2. Posibles condiciones para un láser de CO_2 de diferentes materiales.	30
2.3. Selección de gases para el proceso de plasma.	44
2.4. Velocidades de corte para máquinas de corte por plasma en acero inoxidable.	45
2.5. Tabla comparativa de procesos de corte.	45
3.1. Matriz de selección de procesos de fabricación PRIMA.	56
3.2. Compatibilidad entre materiales y procesos de manufactura.	67
4.1. Analogía entre la neurona biológica y la neurona artificial.	96
6.1. Valores para funciones de pertenencia trapezoidales relación Material-Espesor.	138
6.2. Velocidades para acero medio con diversos procesos de corte.	140
6.3. Valores para funciones de pertenencia trapezoidales para definir complejidad por número de ángulos y perforaciones.	142
6.4. Tolerancias mínimas y máximas para diversos procesos.	145
6.5. Extracto de expertos consultados.	147
6.6. Coste de operación por hora para diversos procesos.	150
7.1. Requerimientos de Diseño Girbau.	155
7.2. Experimentos utilizando el primer enfoque.	161
7.3. Requerimientos de la pieza Messer.	163
7.4. Tiempos de corte de diversos procesos para la pieza Messer.	163
7.5. Sugerencias de expertos para aplicación de Titanio.	166

Glosario de siglas

- C Grados Celsius
- AFM Asociación Española de Fabricantes de Máquinas-Herramientas
- AG Algoritmo Genético
- AHP *Analytic Hierarchy Process*, Proceso de Jerarquía Analítico
- AWJM *Abrasive WaterJet Machining*, Maquinado por Agua más Abrasivo
- CD Corriente Directa
- CDEI Centro de Diseño de Equipos Industriales de la UPC
- CO_2 Dióxido de Carbono
- CN Control Numérico
- CV Caballos de Vapor
- DI Des Ionizador
- Fe Hierro
- Fe_2O_3 Óxido Férrico
- GHz Giga Hertz
- He Helio
- I+D Investigación y Diseño
- KB *Knowledge Base*, Base de Conocimientos
- KBS *Knowledge Based System*, Sistema Basado en el Conocimiento
- KMT Karolin Machine Tool

- Láser *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, Amplificación de Luz por Emisión Estimulada de Radiación)
- LVQ *Learning Vector Quantization*, Cuantificación de vectores de aprendizaje
- N_2 Gas de Nitrógeno
- Nd – YAG *Neodymium-doped Yttrium Aluminium Garnet*, Granate de Itrio y Aluminio, contaminado por Neodimio
- Ne Neón
- OI Ósmosis Inversa
- PRIMA *PRocess Information Maps*, Mapas de Información de Procesos
- P-N Unión entre un semiconductor P y uno N
- QFD *Quality Function Deployment*, Despliegue de Función de Calidad
- RN Red Neuronal
- RNA Red Neuronal Artificial
- SiO_2 Dióxido de Silicio
- SUS *Stochastic Universal System*, Sistema Universal Estocástico
- TOPSIS *Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution*, Técnica para Preferencia de Orden por Semejanza para Solución Ideal
- UACJ Universidad Autónoma de Ciudad Juárez
- UPC Universidad Politécnica de Cataluña
- USM *UltraSonic Machining*, Maquinado Ultrasónico
- WJM *WaterJet Machining*, Maquinado por Agua

Capítulo 1

Resumen de la Tesis

1.1. Introducción

El desarrollo industrial es el resultado de la gran actividad innovadora, de investigación y desarrollo I+D+i, de avances tecnológicos desarrollados, así como la manipulación de materias primas en nuevos componentes y formas para la obtención final de un producto. De acuerdo con la Asociación Española de Fabricantes de Máquinas-Herramientas, la AFM, la producción española de máquinas-herramienta se situó en el año 2009 en 745,1 millones de euros. En la clasificación de la Unión Europea de los principales países productores y exportadores de máquinas-herramienta España ocupa el tercer lugar, en la mundial, es el noveno como productor y exportador [AFM 2010].

Los sistemas que hacen posible la modificación de la forma son conocidos como procesos de manufactura. Un proceso de manufactura es definido como la actividad o conjunto de actividades para transformar un material dado en un producto de diferentes formas o tamaños y el cual por lo regular está acompañado por una variedad de herramientas, equipo y otras ayudas mecánicas así como el esfuerzo humano [Kaush 2008].

Los procesos de manufactura son muy variados, existiendo más de 1000 procesos y sub-procesos, y cada uno de ellos contempla una aplicación distinta [Kalpa 2002]. Una división del amplio universo de procesos, es el del corte de chapa metálica, el cual también incluye una variedad de procesos distintos dentro de su clasificación, cada uno con características particulares de funcionamiento.

Dentro de la clasificación para el corte de chapa metálica, se encuentran

los procesos de corte no convencionales, específicamente los procesos de corte por agua más abrasivo, corte por láser, corte por plasma de alta definición y el oxicorte, los cuales presentan características similares en su función y resultados. Cada uno de los procesos mencionados podría desempeñar la tarea de simplemente “cortar” un material dado para una aplicación en particular, sin embargo, el corte de chapa metálica no es una tarea tan sencilla, considerando que no solamente se trata de obtener una forma, sino que se desea obtener una pieza de calidad, a bajo coste y en un tiempo oportuno, tomando en cuenta parámetros y requerimientos dados por el cliente y con aspectos técnicos estipulados para el proceso. El objetivo de un proceso de corte es obtener una sección de material con la forma deseada, que requiera el mínimo de operaciones secundarias, y que cumpla con los requerimientos proporcionados para su fabricación.

Las técnicas utilizadas para cortar materiales metálicos están sumamente diversificadas; por lo que los usuarios de las diversas tecnologías de corte se encuentran regularmente con problemas para la correcta selección de los procesos, esto representa una elección difícil en lo que respecta a la elección correcta del proceso que será utilizado para la manufactura de una pieza de acuerdo a los requerimientos de diseño.

¿Cuál es la tecnología de corte más apropiada para cada necesidad?, y ¿cómo se determina esta elección? Para lograr obtener un producto final con los requerimientos específicos, es necesario realizar un análisis detallado de la capacidad de los procesos, los requerimientos de la pieza que se desea fabricar, así como los materiales que se desean utilizar y demás factores que se consideren de relevancia para alcanzar una decisión acertada. Aún creando algunos límites o restricciones en la fabricación de un diseño en particular, es decir limitando los procesos sin modificar de manera alguna el producto final, algunos de los procesos mencionados anteriormente aplicarían directamente para ser utilizados.

La elección de un proceso de fabricación, involucra decisiones que ejercerán gran influencia sobre la calidad y costes del producto final. Tales medidas afectan el éxito del producto por lo que existen factores que deben de ser tomados en consideración [Swift 2003]. Antes de cualquier decisión, se debe tener acceso a las correctas fuentes de información y documentación, ya que uno de los principales factores que influyen en dicha selección depende del conocimiento que se tenga de los diferentes procesos. Por lo regular, la selección de un proceso, sólo se limita a aquellos que son bien conocidos [Manoc 2008] o tradicionalmente utilizados.

Una metodología de selección permite hacer frente a un problema expo-

niendo claramente cuáles son los aspectos que se consideran de relevancia, e identificando los procesos factibles de acuerdo a los requerimientos de la pieza, eliminando aquellos que no cumplen éstas restricciones.

Debido a la complejidad de los diversos procedimientos para la selección de procesos, bien sea matemáticamente o por el conocimiento previo que se tenga de cada proceso, existe aún la necesidad de una herramienta de fácil utilización que pueda emular el comportamiento que tendría un experto al seleccionar un proceso de corte no convencional, una herramienta que permita identificar los atributos y obtener la más apropiada combinación de atributos en conjunción con los requerimientos reales de la aplicación de maquinado.

El desarrollo de esta tesis, surgió del interés del Dr. Carles Riba Romeva director del Centro de diseño de equipos industriales CDEI de la UPC por desarrollar una herramienta de fácil utilización que sea aplicable a diseño de equipos creados en pequeñas series, una herramienta que permita al usuario elegir un proceso de corte de acuerdo a un mínimo de parámetros que proporcione. Como resultado de la investigación realizada se presenta la siguiente tesis en la cual se enmarca como tema principal el desarrollo de una herramienta para la selección de procesos de corte no convencionales.

Para facilitar la toma de decisión, se ha desarrollado un sistema inteligente utilizando técnicas de *Soft Computing* (o inteligencia computacional), específicamente la lógica difusa, técnica que nos permite manejar adecuadamente la información incierta, o imprecisa por medio del desarrollo de algoritmos, conjuntos difusos, funciones de pertenencia, grados de pertenencia y funciones de agregación, con el fin de obtener un resultado con un amplio índice de fiabilidad de la misma forma en que un experto en procesos de corte lo hubiera hecho.

La estructura de este sistema ha sido diseñada con:

- Una base de datos de materiales, específicamente de acero, titanio, acero inoxidable y aluminio. Una base de datos para las relaciones velocidad-espesor de los diferentes materiales. Datos de las tolerancias y costes de los diversos procesos.
- Algoritmos que permiten caracterizar cuantitativamente los procesos de corte no convencionales para chapa metálica y el conocimiento y proceso de selección de diversos expertos.
- Un módulo entrada, donde se proporcionan los requerimientos de la pieza a cortar, su complejidad y una prioridad definida: tiempo, coste o acabado.

- Un módulo de salida donde se muestran las mejores opciones en base a la prioridad elegida junto con las diferentes gráficas comparativas de todos los procesos con los criterios de prioridad distintos.
- Un módulo de información general para una comprensión más amplia donde se muestra información teórica, fotografías y videos acerca de cada proceso.
- Desarrollo de un software como interface gráfica para los diferentes módulos y resultados. El sistema de software ha sido elaborado utilizando C# (C Sharp), Microsoft SQL Server 2008, Microsoft Visual Estudio 2005, Microsoft Management Express.

A fin de comprobar la fiabilidad del sistema, se clasificaron tres grupos de experimentos. El primero de ellos es meramente comparativo: la selección del experto vs. la selección del sistema. Esto se realiza solamente para comprobar que el sistema elige, al igual que un experto, el proceso de corte más apropiado. Se analizan los parámetros de piezas elaboradas con un proceso de corte definido y se comprueba la viabilidad de selección. En el segundo grupo se analizan cuantitativamente las capacidades de los diversos procesos al cortar una pieza en base a una prioridad, y posteriormente se comparan éstos resultados con los resultados arrojados por el sistema. El último grupo consiste en la selección del proceso de corte en base a una serie de requerimientos y necesidades de la pieza, se introducen los parámetros de entrada y el sistema arroja los resultados de selección, éstos se comparan con las diversas opiniones de un grupo de expertos.

Los resultados mostrados en cada uno de los experimentos indican que el sistema desarrollado para la selección y comparación de procesos de corte de chapa cumple con los requerimientos necesarios para ser utilizado en la selección de los procesos de corte no convencionales. Esta Tesis presenta paso a paso una metodología para la selección y comparación de procesos de corte de chapa metálica con el objetivo de proporcionar una nueva manera de seleccionar procesos para el corte de materiales por medio de un sistema experto.

1.2. Objetivo General

Diseñar un sistema para la selección de procesos de corte no convencionales que pueda emular el comportamiento de un experto al seleccionar un proceso de corte.

1.2.1. Objetivos Específicos

1. Caracterizar cuantitativamente los procesos de corte no convencionales para chapa metálica.
2. Caracterizar cuantitativamente el conocimiento y proceso de selección de diversos expertos.
3. Analizar los sistemas que permitan generar comportamientos asimilables al conocimiento de la inteligencia humana.
4. Proponer y desarrollar un sistema para la selección de procesos de corte no convencionales que pueda emular el comportamiento de un experto.
5. Evaluar el desempeño y precisión del sistema propuesto mediante la creación de una herramienta de software.

1.3. Metodología del Desarrollo de la Tesis

El plan de desarrollo para la realización de la tesis, el cual surge a raíz del problema propuesto comprende los siguientes puntos: Investigación documental, Investigación de campo, diseño de algoritmos, experimentación, y propuesta metodológica. Una explicación más detallada se presenta a continuación:

1. Análisis de literatura principalmente artículos y literatura de investigación científica, con el objetivo de desarrollar el estado del arte y el marco teórico para el área de procesos de selección no convencionales, específicamente en corte de chapa, y los subtemas necesarios que permitirán la comprensión más clara del objetivo de la tesis. Este análisis permite identificar las líneas de investigación relacionadas a la selección de procesos que utilizan la inteligencia computacional como herramienta en los procesos de selección.
2. Consulta, entrevistas, visitas a empresas, centros de investigación, exposiciones de máquina herramienta y centros educativos con la finalidad de documentar el conocimiento de los expertos en relación a los criterios

de selección de un proceso de corte no convencional, diversas metodologías que se utilizan para llegar a la correcta selección de un proceso de corte. Esta investigación ha permitido obtener una base de datos de conocimiento por parte de los expertos para ser utilizada en la selección de procesos.

3. Diseño de algoritmos basados en lógica difusa, mediante los cuales se podrá emular el conocimiento de los expertos utilizando la base de conocimiento mencionada en el punto anterior.
4. Experimentación y aplicación de cada algoritmo desarrollado a diferentes piezas dadas. Dicho análisis permite comprobar cuantitativamente que los algoritmos desarrollados funcionan correctamente.
5. Elaborar una metodología de selección de procesos de corte no convencionales a partir de la información anteriormente presentada. Dicha metodología será aplicable únicamente a procesos de corte de chapa que utilicen para tal fin corte por láser, corte por plasma, oxicorte y corte por agua.
6. Desarrollo de una herramienta de software para la selección de procesos que incluya en su estructura los algoritmos creados, una base de conocimiento, y demás información necesaria para obtener un resultado rápido a partir de la información proporcionada.

1.4. Contenido de la Tesis

En esta sección se presenta una breve descripción del contenido de los diferentes capítulos que conforman esta tesis.

Capítulo 1: Resumen de la Tesis.

Introducción General.

Capítulo 2: Tecnologías de Corte No Convencionales.

Este capítulo presenta una amplia descripción de los procesos no convencionales de corte por haz en el siguiente orden: primeramente se presenta el proceso mecánico de corte por inyección o chorro de agua, después se presentan los procesos térmicos de corte por láser, oxicorte y finalmente, el corte por plasma. Asimismo se muestra una tabla comparativa de estos procesos.

Capítulo 3: Metodologías para la Selección de Procesos de Fabricación.

En el Capítulo 3 se presentan y analizan diversas metodologías utilizadas para la selección de procesos, se describen brevemente las características

principales de cada una de ellas enfatizando las principales ventajas que presentan y sus áreas de mejora. Primero se abordan las metodologías de selección PRIMA, Ashby, Halevi y Dieter. Enseguida se destacan los Centros de Investigación como apoyo en la selección de procesos. Después se muestran dos Métodos de Evaluación Multi Criterio: el Topsis y AHP. Finalmente se presentan diversas calculadoras de corte disponibles en línea.

Capítulo 4: Inteligencia Computacional.

En este capítulo, se presenta una breve introducción a las principales técnicas que componen el *Soft Computing*. Se introducen los conceptos más relevantes de los algoritmos genéticos seguidos por las redes neuronales, los principios de lógica difusa y los Sistemas Híbridos. Al final del capítulo se presenta una revisión de aplicaciones de Inteligencia Computacional en los Procesos de Selección.

Capítulo 5: Lógica Difusa.

En este capítulo se da una introducción a los sistemas difusos enfatizando la diferencia entre los conjuntos difusos y conjuntos lógicos. Se presenta una breve historia de la lógica difusa y se explican las principales características de un sistema difuso, es decir, las variables lingüísticas, funciones de pertenencia, grados de pertenencia y otros conceptos relevantes a manera de introducción de la aplicación de un algoritmo difuso para la selección de procesos que se verá en el siguiente capítulo.

Capítulo 6: Sistema Difuso para la Selección de Procesos de Corte No Convencionales.

El Capítulo 6 presenta el diseño de un sistema para la selección de procesos de corte no convencionales. Este sistema utiliza un modelo de selección basado en técnicas de lógica difusa, generado a partir de reglas y una base de conocimiento obtenida del conocimiento de diversos expertos. Este capítulo presenta paso a paso el modelo de selección difuso. Se presenta un esquema general del modelo. Enseguida, se detallan los algoritmos necesarios para la medición de los atributos de cada proceso. Finalmente se presenta la selección de procesos teniendo como prioridad el tiempo, el acabado de la pieza y el coste.

Capítulo 7: Experimentos y Resultados.

El Capítulo 7 comprende tres grupos diferentes de experimentos. Primero se muestra una comparativa experto-sistema mediante diversos ejemplos de aplicación. Más adelante se comparan los datos cuantitativos de las capacidades de diversos procesos al cortar una pieza en base a una prioridad, contra los resultados arrojados por el sistema. Finalmente se presenta un

tercer enfoque para los experimentos, se comparan las diversas opiniones de un grupo de expertos con los resultados de selección del sistema.

Capítulo 8: Conclusiones y Futuras Líneas de Investigación.

En este capítulo se presentan diferentes conclusiones generadas a lo largo de la investigación realizada para esta tesis. Cada una de las conclusiones, enmarcan los principales aspectos a considerar para el desarrollo de ésta. Asimismo se destacan diversas futuras líneas de investigación.

1.5. Contribuciones de la Tesis

Las principales contribuciones de esta tesis pueden ser resumidas en:

- Caracterización cuantitativa de los procesos de corte no convencionales para chapa metálica: corte por láser, corte por chorro de agua, corte por arco de plasma y oxicorte.
- Caracterización cuantitativa del conocimiento y proceso de selección de diversos expertos.
- Desarrollo de un sistema para la selección de procesos de corte no convencionales basado en técnicas de lógica difusa que permiten emular el comportamiento de un experto.
- Evaluación del desempeño y precisión del sistema propuesto mediante la creación de una herramienta de software.

1.6. Publicaciones Derivadas de la Tesis

Cortés 2007 Cortés D. and Riba C. “Nuevas Herramientas Para La Selección De Tecnologías,” XI Congreso Internacional De Ingeniería De Proyectos. Lugo, España. pp. 212-220, 2007.

Cortés 2007 Cortés D. and Riba C . “Sheet Metal Forming Process Selection,” E&Pde07 Newcastle Reino Unido pp. 463-470, 2007.

Gonza 2011 González C. y Cortés D. “El impacto de integrar un buen nivel de servicio a un sistema inflexible,” Memorias del IV Seminario de Investigación Interdisciplinaria DIMAUN, Bogotá, Colombia, Mayo 2011.

Cortés 2011 Cortés D., Gordillo N. and Lloveras J. “Fuzzy Techniques Applied to Design & Emotion,” In press 2011.

Bibliografía

- AFM 2010** AFM “La Industria Española de Máquinas-Herramienta en Cifras Año 2009,” Disponible electrónicamente www.afm.es/el-sector-es/sector_cifras-es, 2010.
- Kalpa 2002** Kalpakjian S., Schmid . “Manufactura Ingenieria y Tecnologa” Prentice-hall, 4ta. Ed Cap 1, pp.1-32, 2002.
- Kaush 2008** Kaushish P. “Manufacturing Processes” Prentice-Hall Cap. 1, pp. 1-21, 2008.
- Manoc 2008** Manocher D. “A Computer-Based Economic Analysis for Manufacturing Process Selection,” Proceedings of The 2008 IAJC-IJME International Conference, ISBN 978-1-60643-379-9, 2008.
- Swift 2003** Swift K. and Booker J. “Process selection: from design to manufacture” Elsevier Second Edition, pp.20-34, 2003.

Capítulo 2

Tecnologías de Corte No Convencionales

2.1. Introducción

Las chapas metálicas a través de los años se han cortado con sopletes y con máquinas generadoras de arco eléctrico, máquinas desarrolladas originalmente para trabajos de recuperación y reparación. Estas operaciones se emplean hoy día de manera muy generalizada para cortar chapas y planchas bajo formas previas, destinadas al montaje y otras operaciones de manufactura. La aparición de nuevas tecnologías ha posibilitado el corte de metales y no metales a velocidades, calidad y precisiones superiores a las antes conocidas.

La industria del corte de metales crece, y junto con este crecimiento, se incrementan los requisitos de calidad y productividad de los procesos. Los problemas que actualmente enfrenta la industria se relacionan principalmente con el coste operativo, la productividad (piezas producidas por unidad de tiempo), la factibilidad de la inversión (posibilidad real de amortización) y el impacto ambiental producido por el proceso utilizado [Ferre 2008].

En la constante necesidad de reducir costes, mejorar procesos y tiempos de fabricación, los departamentos de ingeniería y manufactura se han enfocado en buscar nuevas aplicaciones de los diversos procesos adecuadas a su correspondiente campo de trabajo. Los procesos de conformado de chapa, en especial los procesos no convencionales de corte pueden tener ciertas ventajas y capacidades que demuestran mayor eficacia en la batalla del coste y tiempo que los procesos comúnmente utilizados.

2.1. Introducción

Los procesos de corte no tradicionales o convencionales (Figura 2.1), son procesos que remueven material y son de reciente uso en el mercado, o son nuevos para el usuario. Estos procesos proveen opciones adicionales u otras alternativas a ser aplicadas donde los procesos convencionales no son satisfactorios, por ejemplo cuando las formas y dimensiones son complejas o muy pequeñas, la dureza del material es muy alta, las tolerancias son muy justas y se desea una muy fina superficie de acabado, el aumento de temperatura y tensiones residuales deben evitarse, el coste y el tiempo de producción debe ser reducido.

Entre aquellos procesos no convencionales cuyo campo de aplicación es principalmente el corte de chapa, se puede realizar una particular clasificación que lleva a englobar muchos de ellos (90 % de las aplicaciones industriales) en un solo grupo denominado procesos de corte por haz (*beam cutting processes*). En estos procesos, la herramienta se sitúa en dirección perpendicular a la superficie de la chapa. El haz incide en esta dirección y corta la chapa. La naturaleza del haz determina una segunda clasificación: procesos de corte por haz mecánico y procesos de corte por haz térmicos.

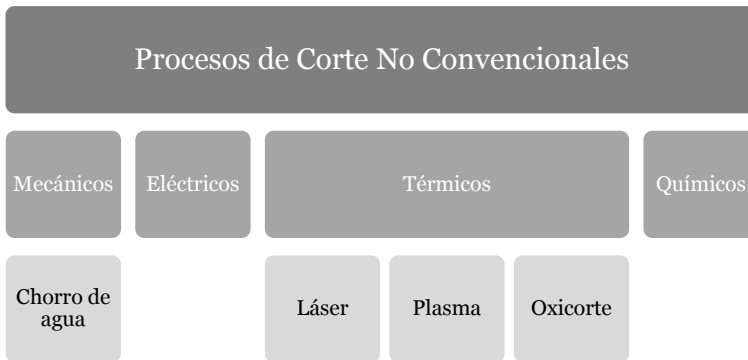


Figura 2.1: Procesos de corte no convencionales [Groover 2007].

Aquellos procesos que utilizan la acción mecánica directa, ya sea de un único material o combinándolo con abrasivos, para incidir sobre el material a cortar, se denominan procesos de corte por haz mecánico (*mechanical beam processes*). Se utilizan cuando no pueden emplearse técnicas tradicionales debido a la dureza del material, a su extrema fragilidad o, principalmente, cuando pueden

resultar dañados si se mecanizan por procesos eléctricos o térmicos (sensibilidad a altas temperaturas). Cabe citar, dentro de los procesos de esta naturaleza, el corte por inyección o chorro de agua con o sin abrasivos (*waterjet machining*, WJM y *abrasive waterjet machining*, AWJM).

Cuando la separación del material se debe principalmente al efecto de las altas temperaturas localizadas sobre una pequeña zona de material, estamos ante los procesos de corte por haz térmicos. Tienen un amplio campo de aplicación, y ocupan un segmento cada vez mayor del mercado. Esto se debe en parte, no sólo al incremento en el número de máquinas, sino también a la diversidad de fuentes de energía utilizadas para provocar el aumento térmico localizado. El láser (*laser beam cutting*), el oxicorte (*flame or oxygen-flame cutting*), y el arco de plasma (*plasma arc system*) son los principales procesos aplicables a la chapa.

Debido a las características de estos procesos, existe una gran diversidad de materiales, formas y espesores que pueden ser procesados apropiadamente. El propósito de este capítulo, es dar una introducción a los procesos de corte no tradicionales.

2.2. Resumen del Capítulo

A continuación se presenta una amplia descripción de los procesos no convencionales de corte por haz en el siguiente orden: primeramente en la Sección 2.3 se presenta el proceso mecánico de corte por inyección o chorro de agua, después se presentarán los procesos térmicos de corte por láser (2.4), oxicorte (2.5) y finalmente, el corte por plasma en la Sección 2.6. Una tabla comparativa de estos procesos se muestra en la Sección 2.7. Las conclusiones del capítulo se presentan en la Sección 2.8.

2.3. Corte por Chorro de Agua

El proceso de maquinado por agua (WJM) o por agua más abrasivo (AWJM) son dos procesos de maquinado no tradicionales o convencionales. Pertenecen al grupo de procesos mecánicos no convencionales como el maquinado ultrasónico (USM) y maquinado por abrasivo. En estos procesos, la energía mecánica de las fases de agua y abrasivo son usadas para la eliminación del material.

El corte por chorro de agua a alta presión es una útil alternativa a los procesos de corte térmico tradicionales, no es un proceso térmico, este método de corte no calienta ninguna parte del material cuando es cortado. El corte es logrado por la erosión rápida del material por una corriente de agua a alta presión. Un abrasivo en polvo puede ser añadido al chorro de agua, por lo regular cuando los materiales a ser cortados son metales.

El Doctor Norman Franz es considerado el padre del corte por chorro de agua. Fue la primera persona que estudió el uso del agua a ultra alta presión como instrumento de corte. Franz, al buscar una aplicación para cortar árboles gruesos en los años cincuenta, dejó caer grandes pesos sobre columnas de agua, forzando a salir el agua por un pequeño orificio. Patentó el concepto de corte por agua, con una presión de 7000 *bares* en 1968. En 1979, el Doctor Mohamed Hashish, comenzó a investigar métodos para aumentar el poder cortante del waterjet, haciendo uso de abrasivos de granate, un material comúnmente usado sobre el papel de lija. Con este método, el AWJM (conteniendo abrasivos) podría cortar prácticamente cualquier material. En 1980, el AWJM fue usado por primera vez para cortar acero, cristal, y hormigón [Bened 1987].

La técnica del corte por chorro de agua consiste en utilizar para el corte la abrasión del agua hasta valores superiores a los 4100 *bares* (60,000 *psi*) [Ortega 2007]. Ésta, a una velocidad de 960 *km/hr* (600 *mph*) [Gidley 2009], y mezclada con arenas abrasivas, es capaz de cortar, casi cualquier tipo de material de grandes espesores con unos contornos excelentes; materiales metálicos como el acero al carbono, inoxidable, titanio, aluminio, etc. y no metálicos como piedra, cristal, cerámica, compuestos, plásticos, etc.

Estos sistemas de chorro de agua pueden cortar material de hasta 200 *mm* de espesor en cualquier forma geométrica. No hay afectación térmica en ninguna zona, ni tensiones, ni cambios metalúrgicos. Tampoco se producen polvos, rebabas ni decoloraciones, y se obtienen piezas con tolerancias de 0,1 *mm* que resultan prácticamente acabadas.

2.3.1. Componentes Básicos y Principio de Operación

Generar y controlar el agua a presiones de más de 4100 *bares* (60,000 *psi*), requiere de un diseño sofisticado. A estas presiones un escape leve puede causar daño de erosión permanente a los componentes [Flow 2002]. La tecnología básica del corte por chorro de agua está compuesta por bombas, tuberías de alta presión, y un cabezal de corte. La Figura 2.2 muestra la configuración básica de un sistema de corte por chorro de agua.

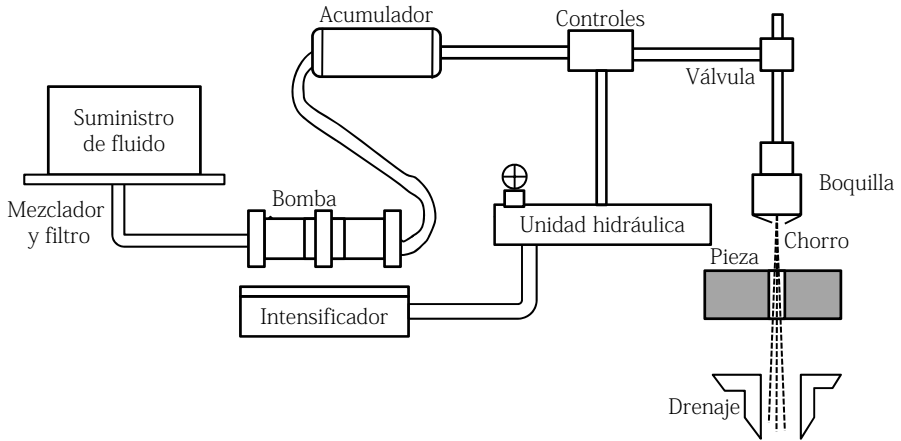


Figura 2.2: Configuración básica de un sistema de corte por chorro de agua.

Bomba. La bomba es la parte más importante de este sistema de corte, ya que presuriza el agua y la envía continuamente a la cabeza de corte que entonces convierte esta agua presurizada en un chorro supersónico. En estos sistemas pueden utilizarse dos tipos de bombas: bombas de accionamiento directo y bombas intensificadoras.

- Bombas de accionamiento directo (*direct drive pump*). Este tipo de bomba de triple émbolo, consigue el movimiento para sus émbolos directamente del motor eléctrico. Son utilizadas en los sistemas de corte por agua debido a su simplicidad, y son capaces de enviar una presión continua de 10 a un 25% menor que las bombas intensificadoras.
- Bombas intensificadoras (*intensifier based pump*). En la bomba intensificadora existen dos circuitos, el circuito del agua y el circuito

hidráulico.

El circuito de agua consiste en los filtros de admisión de agua, la bomba, el intensificador, y el atenuador de choque. El agua del grifo ordinaria es filtrada por el sistema de filtración de admisión de agua, ésta viaja a la bomba donde la presión es mantenida aproximadamente a 6.2 *bares* (90 *psi*) asegurándose que el intensificador nunca esté desprovisto de agua. Luego el agua se presuriza a más de 4100 *bares* (60,000 *psi*). Antes de que el agua salga de la bomba, pasa por el atenuador de choque donde se asegura que el chorro de agua será constante y estable, ya que de lo contrario un flujo irregular o pulsado dejaría marcas sobre el material.

El circuito hidráulico consiste en un motor eléctrico (25 a 200 *CV*), la bomba hidráulica, el depósito del aceite, el colector, y el pistón. La bomba hidráulica toma el aceite del depósito y lo presuriza a 200 *bares* (3,000 *psi*). Este aceite a presión es enviado al colector donde las válvulas del colector crean la acción del intensificador enviando el aceite hidráulico a los émbolos, entregando el agua de alta presión a un lado mientras el agua de presión baja llena el otro lado. El aceite hidráulico entonces es enfriado durante el regreso al depósito.

Tuberías de alta presión. Una vez que la bomba de alta presión ha creado la presión de agua, ésta es enviada por tuberías a la cabeza de corte. Además de transportar el agua, las tuberías proporcionan también libertad de movimiento a la cabeza de corte. Estas tuberías generalmente son de acero inoxidable.

Cabezal de corte. El cabezal consiste en una válvula de aguja pilotada neumáticamente y un tubo colimador, al final del cual se monta una boquilla de forma cónica con una tuerca especial. Es aquí donde se consiguen las velocidades *MACH* 2-3. Para cortes típicos, el diámetro de la boquilla oscila entre 0,007-0,014 *mm* (0,17-0,35'') [KMT 2009]. Los tres tipos de materiales más comunes son el zafiro, el rubí y el diamante [Mcguir 2006]. Cada uno tiene sus propios atributos únicos.

2.3.2. Tipos de Corte por Chorro de Agua

Esencialmente existen dos tipos de corte por chorro de agua, agua pura y agua más abrasivo. Las máquinas son diseñadas para utilizar sólo agua, agua más abrasivo o ambas. Sin embargo con cualquiera de ellas, el agua debe de

ser primero presurizada.

Corte por Chorro de Agua sin Abrasivo

En el corte por chorro de agua, el proceso de remoción de material puede ser descrito como un proceso de erosión supersónica. No es la presión, sino la velocidad del chorro lo que corta el material.

El agua pura es usada principalmente para materiales relativamente blandos, como plásticos, textiles, papel, materiales de sellados, envoltorios metálicos, contrachapados de hasta 10 *mm*, fibra óptica de hasta 6 *mm*, pero también hojas delgadas de metales. Con el corte sin abrasivo las características del proceso son:

- La geometría es extremadamente detallada.
- Pérdida mínima de material debido al corte.
- No es un proceso térmico, por lo que no daña la superficie del material.
- Corta espesores gruesos (hasta 100 *mm* en materiales esponjosos).
- Capacidad de trabajar 24 horas.

Corte por Chorro de Agua más Abrasivo

Este corte difiere del corte sin abrasivo sólo en pocas cosas. En el agua sin abrasivo el chorro supersónico erosiona el material. Con abrasivo el chorro acelera las partículas abrasivas (Figura 2.3), y éstas, no el agua, erosionan el material [Sylvia 1996].

Este proceso es más poderoso que sólo el corte con agua, ya que corta materiales duros como metales, piedra, materiales compuestos y cerámicos. Algunas características de este tipo de corte son:

- Es un proceso sumamente versátil (metalmecánica, industria alimenticia, biomedicina, etc.)
- No ocasiona zonas térmicamente afectadas.
- No hay fatigas mecánicas.
- Corta material delgado así como de espesores grandes (de 2 *mm* a 100 *mm* en metales).

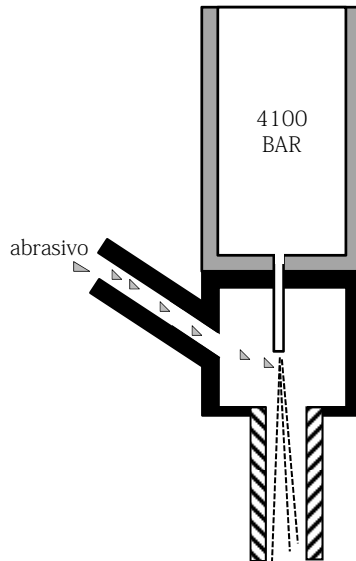


Figura 2.3: Corte por chorro de agua más abrasivo.

- Reduce operaciones secundarias (desbarbado, pulido, pintura).

Los sistemas con abrasivo son en sí sistemas de agua pura, ya que el abrasivo es añadido después de que el chorro de agua ha sido creado, es entonces cuando las partículas abrasivas son aceleradas. El abrasivo utilizado en el corte es arena con un tamaño especial, la más común es llamada garnet el cual es de características duras, resistentes y baratas. Diferentes tamaños del abrasivo garnet son utilizados para funciones distintas:

- Garnet 120 produce superficies suaves.
- Garnet 80 es el tipo más común, de uso general.
- Garnet 50 Corta un poco más rápido que el 80, con la superficie ligeramente más áspera.

2.3.3. Características del Corte por Chorro de Agua

Las siguientes recomendaciones han sido elaboradas por los fabricantes de sistemas de corte por agua, algunas de ellas obvias, sin embargo, otras sólo se detectan a través de la experiencia.

- Cuando se corta material muy delgado (alrededor de 2 mm) no se recomienda utilizar sistemas de potencias medios (50 CV) o altos (de 60–80 CV). Utilizar 25 CV será suficiente considerando la posibilidad de incrementar si es necesario.
- Cuando se trabaja con granos abrasivos de tamaño 120 o más pequeños, éstos trabajarán más lentamente en la pieza, pero la superficie será más lisa comparada con los abrasivos 80 ó 50.
- La productividad es el coste por unidad de longitud cortada, no el coste por hora. No es tan importante cuánto cueste operar una máquina de corte por abrasivo, lo que es realmente importante es cuantas piezas se pueden fabricar por periodo de tiempo. No es recomendable disminuir el flujo del abrasivo, aun cuando el abrasivo signifique $\frac{2}{3}$ partes de los costes de operación, se deben producir las piezas rápidamente para consumir los gastos (mano de obra, instalaciones, pago de arrendamiento). Se debe cortar lo más rápido posible utilizando todos los caballos de fuerza disponibles y la tasa máxima del flujo de abrasivo. A mayor velocidad, menor coste.
- Los sistemas que han sido específicamente diseñados para un proceso son típicamente más eficientes y fáciles de usar que un sistema genérico de control multiproceso.
- La mayoría de las máquinas no automatizan el manejo del material, sólo cuando el manejo de material constituye una parte significativa de coste de producción debería ser considerada la automatización. El 90 % de todas las máquinas de chorro de agua con abrasivo se cargan y descargan manualmente o con la ayuda de simples grúas o elevadores. Aproximadamente el 50 % de las máquinas sin abrasivo automatizan la manipulación de materiales. El tiempo que toma cortar una hoja entera es bastante bajo, y el coste de la automatización es lo suficientemente alto como para justificar el incremento de capital.
- Normalmente se utiliza agua del grifo para alimentar los sistemas de chorro de agua. El 90 % sólo requieren ablandar el agua antes de enviarla a través de los filtros de entrada de la bomba y después al intensificador. La ósmosis inversa (OI) y los des ionizadores (DI) tienden a hacer que el agua tan pura adopte los iones de los materiales circundantes como los metales de la bomba y de las tuberías. OI y DI pueden extender la vida de la boquilla, pero dañan las bombas y las tuberías que son mucho más caras.

Velocidades de Corte

Las velocidades de corte dependen de varios factores: el espesor del material, el diámetro de la boquilla, el alimentador del abrasivo, la presión y la calidad del corte.

Espesor del material. La velocidad se relaciona con el espesor de forma no lineal, por medio del espesor, la velocidad es dos veces mayor.

Diámetro de la boquilla. Una boquilla más gruesa implica más energía, por lo tanto se aumenta la velocidad de corte. Una boquilla del doble de diámetro lleva cuatro veces más de caudal de agua, siendo el incremento de la velocidad de 80 %. Por lo tanto es mejor utilizar pequeñas boquillas con múltiples cabezales en paralelo.

Alimentador de abrasivo. La velocidad puede también aumentarse incrementando el aporte de abrasivo. Aquí también el doble de aporte no significa el doble de la velocidad de corte. Dependiendo del espesor, el resultado es un aumento del 20-40 %.

Presión. Presiones altas de corte suponen más energía en la pieza de trabajo, esto aumenta el poder del corte. Con altas presiones se pueden aumentar los aportes sin obstruir los focalizadores. Por lo tanto, un aumento de presión del 10 %, consigue aumentar las velocidades de corte en más del 10 %.

Calidad del corte. Dependiendo de si el contorno del corte tiene que ser simple o si la pieza requiere un acabado de alta calidad, el tiempo, y por consiguiente el coste, puede multiplicarse por cinco. Un chorro guiado muy rápido, que justo atraviesa el material, deja un perfil en forma de V, creando una superficie irregular en el fondo. El chorro debe guiarse de modo más lento para que el perfil sea más liso. Como norma general, a una velocidad de corte de $\frac{1}{5}$ de la velocidad máxima de corte, se consigue una superficie en perfecto pulido [KMT 2005]. Una velocidad más lenta lleva a la pérdida de la orientación del material, provocando erosión en las partes más bajas de la pieza y creándose un perfil en forma de A. La Figura 2.4 muestra diversas calidades de corte.

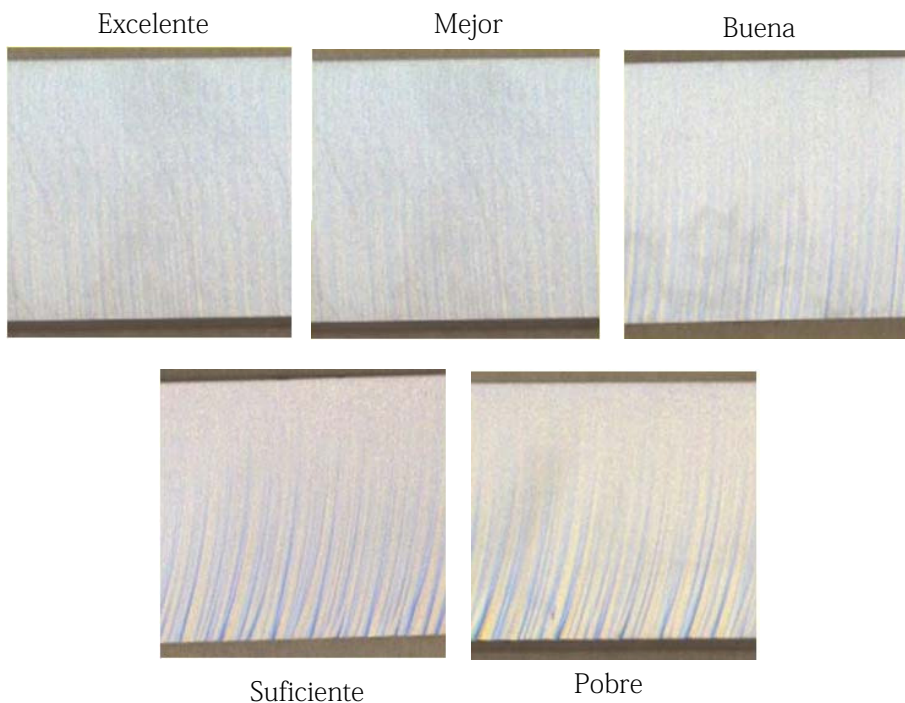


Figura 2.4: Calidades de corte por chorro de agua. Imágenes de FBN Metal Products Inc. [FBN 2002].

2.4. Corte por Láser

Los inicios del láser datan de principios del siglo XX, cuando Albert Einstein postula de forma teórica la existencia de la emisión estimulada, planteando la posibilidad de amplificar la luz [Einstein 1917]. Hasta mediados de los años cincuenta la capacidad para producir radiación electromagnética coherente iba desde las frecuencias más bajas hasta docenas de giga hertz (GHz).

A partir de este momento, la verificación experimental y utilización tecnológica del fenómeno de emisión estimulada de la radiación, ya previsto por Einstein en 1917, permitió ensanchar la banda de frecuencias hasta el ultravioleta e incluso más allá. Los primeros amplificadores y osciladores que funcionaron según este principio trabajaban a frecuencias de microondas y se denomina-

ron máseres (*microwave amplification by stimulated emission of radiation*). La utilización del fenómeno en la zona espectral de luz llevó a dispositivos denominados máseres ópticos, más conocidos en la actualidad como láseres [Baschs 1988]. Sin embargo, no fue sino hasta la década de los setenta cuando los láseres alcanzaron la suficiente madurez para poder ser utilizados en aplicaciones industriales.

El Láser es el acrónimo de *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* (amplificación de luz por emisión estimulada de radiación) y en la actualidad es un instrumento tecnológico ampliamente utilizado en la industria, una unidad óptica que produce radiación en intensa y controlable cantidad de energía [Amiss 2004]. El láser es, ante todo, una fuente de luz. Sin embargo, la luz generada por un láser posee unas propiedades que la distinguen de la luz obtenida por las fuentes convencionales y la hacen mucho más útil y manejable. El grado de coherencia temporal y espacial, a potencias muy elevadas, es de muchos órdenes de magnitud superior a la de cualquier otra fuente de luz conocida. Por ejemplo, la línea de emisión del laser de CO_2 más intensa está a $10,6 \mu m$ en el infrarrojo (ver espectro electromagnético de la Figura 2.5).

El corte por láser es un proceso inducido térmicamente, en el cual la energía de un haz de luz focalizado, es absorbida por un material que se vaporiza formando así el corte. Los factores que determinan la posible aplicación del láser en el corte de materiales son en su mayoría propiedades ópticas, térmicas, eléctricas y mecánicas del propio material. La absorción de la radiación incidente es uno de los más importantes. No sólo depende de las características del material, sino también de la longitud de onda de la radiación [Baschs 1988].

2.4.1. Componentes Básicos y Principio de Operación

Los elementos que integran un sistema láser son: generador, sistema de conducción del haz, sistema de manipulación, dispositivos de control y sensores, sistema de seguridad, mezclador de gases, monitorización e intercambiador de calor. Estos elementos comprenden un medio activo, un mecanismo de excitación y un resonador óptico.

Medio activo. Se trata de una colección de átomos o moléculas que son excitados hasta producirse una inversión de población. Es un amplificador óptico, es decir, un haz de luz coherente que entra por uno de sus extremos, se amplifica por medio de la emisión estimulada, resultando a su salida un haz coherente de más intensidad. El medio activo puede ser un gas, líquido, sólido o una unión $P - N$ en un semiconductor.

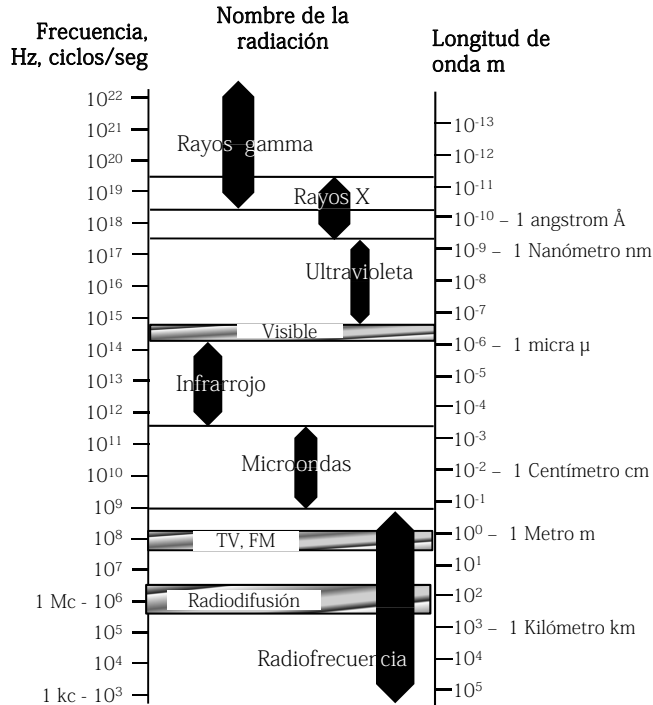


Figura 2.5: Espectro electromagnético.

Mecanismo de excitación. Se trata de una fuente de energía, que excita o bombea los átomos o moléculas del medio activo, desde estados de baja energía a estados excitados, para crear la inversión de población.

Resonador óptico. Consiste generalmente en un par de espejos colocados a ambos extremos del medio activo, su misión es hacer rebotar adelante y atrás la radiación a través del medio activo, dejando salir únicamente un porcentaje de la energía presente en el interior del mismo [Dorron 1999].

En la Figura 2.6 se muestra un esquema del principio de funcionamiento del corte por láser [Groover 2007]. Este principio se puede resumir de la siguiente manera [Hugh 2006]:

- Las descargas eléctricas son utilizadas para provocar una inversión de población de electrones y causar emisiones espontáneas de fotones.

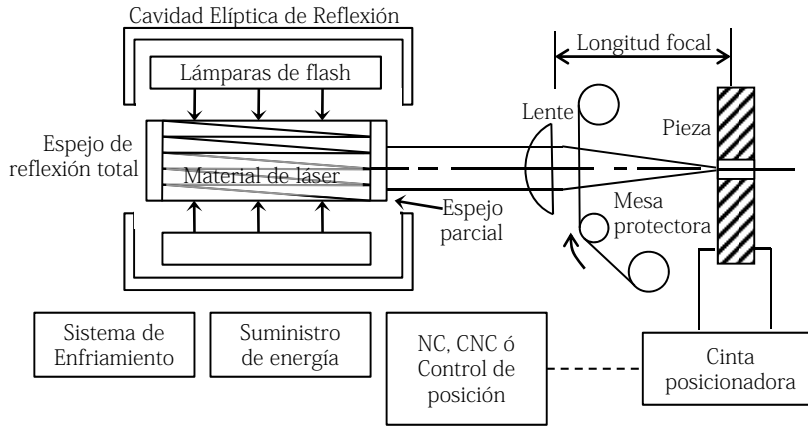


Figura 2.6: Esquema del funcionamiento de corte por láser [Groover 2007].

- Los nuevos fotones viajan en todas direcciones, pero algunos se desplazan hacia los espejos, donde se reflejan de ida y vuelta entre ellos.
- A medida que los fotones viajan, causan la generación de otros fotones viajando en la misma dirección. Esto sucede hasta que el láser tiene una salida de alta intensidad.
- El haz de salida escapa a través de uno de los extremos del láser que tiene un espejo.

Clasificación de Láseres

Existe una gran variedad de láseres en la industria, dependiendo de las características de cada uno, es su aplicación. Los láseres se caracterizan en gaseosos, láseres de medio activo sólido y láseres de medio activo líquido:

Gaseosos. El medio activo es una mezcla gaseosa, excitada con una descarga eléctrica. Los más comunes son los de CO_2 , los de $He-Ne$ y los excímeros.

Láseres de medio activo sólido. El medio activo es un cristal dopado, es decir, un cristal con iones de impurezas. Son láseres más robustos, de fácil mantenimiento y capaces de generar pulsos muy intensos. Los más utilizados son el $Nd-YAG$, y los láseres de semiconductores.

Láseres de medio activo líquido o colorante. El medio activo son tintes orgánicos en líquidos como alcohol etílico, alcohol metílico o agua.

Los láseres más utilizados en el procesamiento de materiales y particularmente en corte de chapa, son los láseres de CO_2 y los de $Nd - YAG$. A continuación se describen ambos láseres.

Láser de CO_2

El medio activo de este tipo de láser es una mezcla de CO_2 , N_2 y He . La potencia varía desde unos pocos de vatios hasta 15 kw [Dorron 2001]. La línea de emisión más intensa está a $10,6 \mu m$ en el infrarrojo. Este tipo de láser es el más común en aplicaciones industriales, ofrece a la vez alta potencia y eficiencia para longitudes de onda infrarrojas, pudiendo ser utilizado en una gran diversidad de aplicaciones como: corte, soldadura y tratamientos térmicos de metales.

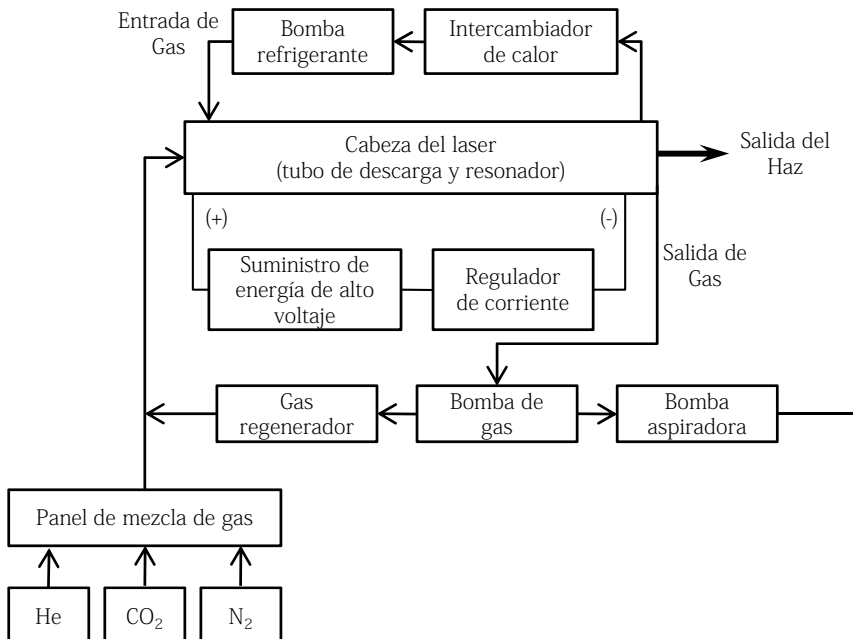


Figura 2.7: Sistema de corte por láser de CO_2 .

La transición láser tiene lugar entre los niveles vibro-rotacionales de la molécula de CO_2 . El bombeo se realiza por medio de una corriente eléctrica que atraviesa la mezcla gaseosa. Las moléculas se bombean del estado fundamental a estados de más alta energía, des excitándose por medio de procesos radiactivos y no radiactivos, hasta el estado que es meta estable. Con un bombeo suficiente se produce inversión de población y cuando ésta es tal que iguala el umbral de oscilación, se produce la salida del haz láser, de suficiente pureza en la zona de descarga, eliminando periódicamente una porción y reemplazándola por una nueva. La Figura 2.7 muestra un esquema de este sistema.

Estos tipos de láser son capaces de producir cantidades grandes de energía debido a su alta eficiencia, que puede alcanzar un 30 %. Parte de esta eficiencia es debido a la óptica que utiliza. La óptica debe de estar fabricada de materiales específicos que reflejen o sean transparentes a la radiación infrarroja.

Para obtener una ganancia máxima en un láser, la mezcla debe estar aproximadamente a 150-200 °C. Para mantenerla a esta temperatura es necesario refrigerarla, ya sea por refrigeración por conducción la cual es típica en los láseres de baja potencia, y la refrigeración por convección más común en los de alta potencia. Todos los generadores láser que superan en pocos vatios la potencia de salida utilizan algún tipo de mecanismo de recirculación de gas para garantizar la presencia continua de mezcla gaseosa.

Láser de $Nd - YAG$

El láser de *Neodymium-doped Yttrium Aluminium Garnet* o $Nd - YAG$, es un láser de estado sólido. El medio activo de este tipo de láser es una barra de cristal de granate de itrio y aluminio, conocido comúnmente como YAG . Está dopado con un 1 % de Ion Nd , el cual se distribuye aleatoriamente como impureza de sustitución en lugares ocupados por el Ion Y_3 , proporcionándoles niveles de energía tanto de bombeo como de la transición láser. El bombeo del medio activo es del tipo óptico, por medio de lámparas de flash de Xenón o Kriptón. Éstas actúan desde el visible hasta el ultravioleta (Figura 2.5), siendo en este rango donde se encuentran las ondas de absorción del Ion Nd^{3+} . La salida es generalmente pulsada, el haz láser que producen, puede ser transmitido por fibra óptica de SiO_2 . Esto va a permitir el uso de sistemas de transmisión de haz láser de gran flexibilidad, que facilitarán la integración de estos generadores con manipuladores.

El corte de chapa es más usual con láseres de CO_2 , sin embargo la libertad de manipulación del rayo ofrecido por la fibra óptica, permite hacer el láser $Nd - YAG$ atractivo para aplicaciones tridimensionales. El pico más alto de

potencia es una ventaja al cortar material con mayor espesor, además de que la zona afectada por el corte en espesores delgados es más pequeña.

2.4.2. Tipos de Corte por Láser

El corte por láser es la aplicación más extendida entre los sistemas de láser, ya que produce cortes con mayor rapidez y calidad que los procesos alternativos. Existen diferentes tipos de corte por láser: corte por vaporización, corte por fusión, corte por fusión reactiva, corte por fractura controlada, corte frío, corte mediante gas estabilizado por láser y troquelado [Dahotre 2008]. La Tabla 2.1 presenta diversos tipos de corte por láser para diferentes materiales.

Tabla 2.1: Diversos Tipos de Corte por Láser.

Tipo	Principio	Propiedades de Material	Ejemplo
Vaporización	Vaporización directa del material por energía láser con ayuda de gas inerte.	Baja conductividad, bajo calor de vaporización.	Tela, madera, papel, etc.
Fusión	La energía del láser derrite el material que es posteriormente expulsado por el chorro de gas inerte.	Materiales de alta conductividad	Materiales no ferrosos (titanio, aluminio, etc.)
Fusión reactiva	La reacción exotérmica crea una fuente adicional de energía. Los materiales fundidos se eliminan por el chorro de gas reactivo en forma de mezcla de óxido y metal.	Alta conductividad, materiales reactivos.	Acero templado, titanio, acero inoxidable, etc.
Fractura controlada	La energía láser introduce tensiones en un área localizada seguido de ruptura inducida mecánica o con láser.	Materiales frágiles.	Alúmina y otras cerámicas.

Corte por vaporización. El láser proporciona el calor latente hasta que el material alcanza el punto de vaporización y ablación. Debido a que la remoción del material se debe al cambio de fase directa a vapor, la calidad del corte es muy alta, con bordes limpios. El método es adecuado

principalmente para los materiales con baja conductividad térmica, como materiales orgánicos, tela, papel, y polímeros. Un chorro de gas no reactivo se puede utilizar para reducir la carbonización [Ready 1997].

Corte por fusión. Un rayo láser se mueve en relación a la pieza de trabajo y sigue una trayectoria recta o curva (de corte recto o corte de perfil). La absorción de energía del haz de alta intensidad funde el metal en todo el espesor del material, creando así un frente de corte. En el caso de cortes ciegos, la altura del corte frontal es más pequeña que el grosor de la pieza de trabajo. El corte frontal se presenta en forma de una fina película de material fundido. Generalmente se emplea una boquilla cónica con ayuda de gas, coaxial con el haz de láser. En el corte por fusión, sólo gases no reactivos como el argón o nitrógeno, se usan de la misma forma en que el oxígeno es utilizado en el corte por fusión reactiva. El gas a alta presión impulsa la película, si el momento de la película excede las fuerzas de tensión superficial, la fusión se acelera y la expulsa verticalmente desde la parte inferior de la ranura en forma de gotas, de lo contrario se producen rebabas. Dado que la transformación de fase primaria implica derretimiento, las necesidades de energía para el corte por fusión son más bajas en comparación con el corte por vaporización.

Corte por fusión reactiva. Es una variación del corte por fusión en el que un gas reactivo se utiliza en lugar de un gas inerte. El material se calienta hasta el punto en que se activa una reacción exotérmica con un chorro de gas oxidante coaxial, añadiendo así otra fuente de calor al proceso. En general, la temperatura a la que la oxidación se vuelve dominante, es mucho menor que la temperatura de evaporación. Debido a los efectos combinados de la radiación láser absorbida y la reacción exotérmica, la capa fundida en el frente de corte llega a la temperatura de evaporación, lo que facilita la remoción del material por vaporización de la superficie. Además, las fuerzas de fricción entre el chorro de gas y la película fundida en el frente de corte, hacen que la capa fundida sea expulsada a la parte inferior de la pieza de trabajo cubriendo el material fundido [Schuo 1987]. El método se utiliza principalmente para el corte de aceros inoxidable, titanio y aleaciones de aluminio.

Fractura controlada. La energía láser incidente produce tensiones mecánicas en un área localizada de la pieza de trabajo, y causan que el material se separe controladamente por el camino del haz del láser. Dado que la separación del material se debe a la propagación de la fractura y no a la evaporación y/o fusión, la energía requerida es menor que en el corte por vaporización. Por otra parte, las características de propagación

de fractura de los materiales quebradizos, permiten velocidades de corte mucho más altas que las técnicas de corte por láser convencionales. Este método ha sido aplicado con éxito con altas velocidades de corte en materiales frágiles como la cerámica de alúmina y vidrio para cortes simples y directos.

Corte frío. Se realiza mediante láseres de gran potencia, donde el material es eliminado sin calentarse, dejando un surco libre de virutas.

Corte mediante gas estabilizado. Se emplea para cortar espesores grandes con potencias relativamente pequeñas en un ambiente de oxígeno.

Troquelado. Es perforar la superficie del metal con una línea de agujeros, para que el material pueda ser cortado mecánicamente.

2.4.3. Características del Corte por Láser

Existen grandes ventajas del corte por láser sobre otros métodos mecánicos. Primero como el láser es un proceso térmico, la efectividad del corte dependerá de las propiedades térmicas del material, y su absorción de la energía láser depende de sus propiedades mecánicas. Por lo tanto, los materiales duros y frágiles pueden ser cortados fácilmente con un láser si sus propiedades térmicas como conductividad o punto de fusión, etc. son favorables. Segundo la transferencia de energía entre el láser y el material ocurre sin contacto mecánico, por lo tanto no es inducido daño mecánico al material.

Como se mencionó anteriormente, los láseres más utilizados en el procesamiento de materiales y particularmente en corte de chapa son los láseres de CO_2 y los de $Nd - YAG$ en continuo o en pulsado, asistido por un gas a alta presión, el cual tiene la misión de arrastrar el material fundido fuera del surco de corte.

Cuando la energía de un haz de láser se focaliza sobre una pieza de trabajo, una parte de la misma es absorbida produciéndose calor. Este calor se usa para vaporizar, fundir o transformar el material. La característica más importante del proceso de materiales por láser es que la energía del haz se puede aplicar en una porción muy pequeña de la pieza de trabajo y durante intervalos de tiempo muy cortos. El láser ofrece eficiencias de proceso extremadamente altas; comparativamente muy superiores a los sistemas clásicos. Las características del corte por láser se pueden resumir de la siguiente forma:

- El proceso no tiene contacto mecánico con la pieza.

2.5. Oxicorte

- Admite fácil automatización.
- El surco de corte es muy reducido, debido al tamaño de punto de focalización.
- La zona afectada por el calor del corte es muy reducida.
- Las velocidades de corte son altas (Tabla 2.2 [Kannat 2009]).
- Es posible cortar perfiles agudos.
- El límite de espesores oscila entre los 15-20 *mm*.
- Por lo general el coste del proceso es elevado.

Tabla 2.2: Posibles condiciones para un láser de CO_2 de diferentes materiales [Kannat 2009] (Acero inoxidable, gas de aporte: Nitrógeno, Aluminio: Nitrógeno, Titanio: Argón).

Material	Grosor (<i>mm</i>)	Potencia (<i>W</i>)	Vel. de Corte ($\frac{m}{min}$)	Presión (<i>kPa</i>)
Acero al Carbón	0.5	250	3.5	
Acero al Carbón	1.5	400	4.0	
Acero al Carbón	3.0	600	3.0	
Acero al Carbón	6.0	1200	1.5	
Acero Inoxidable	1.0	1000	3.5	600
Acero Inoxidable	1.5	1500	3.5	700
Acero Inoxidable	3.0	1800	2.0	800
Acero Inoxidable	6.0	2000	1.0	1200
Aluminio	1.0	1200	3.0	600
Aluminio	1.5	1500	2.5	800
Aluminio	3.0	1800	1.0	1000
Titanio	1.0	800	3.5	600
Titanio	1.5	900	3.0	700

2.5. Oxicorte

El oxicorte es un proceso en el cual por medio de una reacción química controlada se remueve el metal precalentado, por oxidación, mediante una corriente de oxígeno puro. En este proceso, una flama de gas y oxígeno calienta la

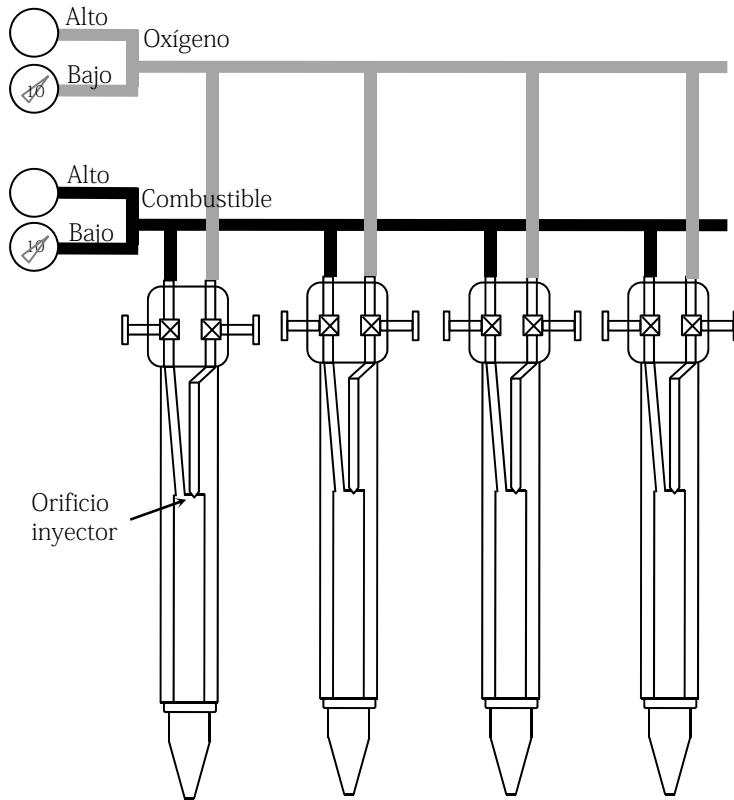


Figura 2.8: Configuración simple de oxicorte [ESAB 2006].

pieza de trabajo a la temperatura de ignición, y un chorro de oxígeno alimenta la acción de corte, produciendo oxidación.

El proceso fue desarrollado completamente en el siglo XX y sus primeras aplicaciones se llevaron a cabo en Europa. No obstante, su total desarrollo hasta lo que hoy conocemos por oxicorte se produjo en Estados Unidos durante el primer cuarto del siglo XX [Rico 2002].

El equipo simple de corte consiste en dos cilindros uno de oxígeno y el otro de gas, reguladores de flujo, mangueras de suministro y una boquilla de corte, como el que se observa en la Figura 2.8 [ESAB 2006]. Este tipo de equipo

de uso manual es portable y de bajo coste. Las máquinas de corte usadas a nivel industrial emplean una o más boquillas de corte las cuales son guiadas mediante sistemas de control por ordenador. Estos sistemas mejoran las tasas de producción, además de que proporcionan una mejor calidad de corte en formas regulares e irregulares en chapas planas [Craig 1996].

2.5.1. Componentes Básicos y Principio de Operación

Para que se produzca una reacción de combustión son necesarios tres requisitos; presencia de combustible (a su temperatura de ignición), presencia de comburente (en una mínima proporción), y un agente iniciador. En el proceso de oxicorte, el combustible es el Fe , el comburente el O_2 , y el agente iniciador, la llama del soplete. El material es calentado hasta su temperatura de ignición, al llegar a esta temperatura, la superficie del metal toma una coloración rojo brillante. Un flujo de oxígeno es dirigido al área precalentada causando una rápida oxidación del metal y generando grandes cantidades de calor. Este calor apoya la continua oxidación del material de acuerdo al progreso del corte, luego el gas combustible y el flujo de oxígeno funden el material de nuevo exponiendo una nueva superficie para cortar. La Figura 2.9 muestra cómo el progreso del corte en el metal deja una ranura de corte o *kerf* a través del material, y en la Figura 2.10 [Schrade 2000], se muestra un esquema del principio de operación del oxicorte.

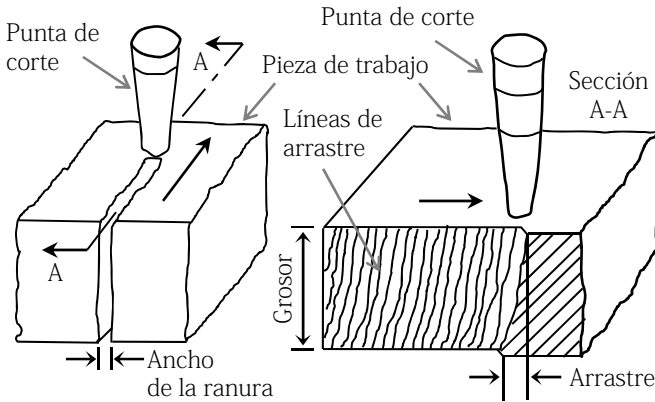


Figura 2.9: Ranura de corte o *kerf*.

El proceso de oxicorte utiliza un gas combustible cualquiera (acetileno,

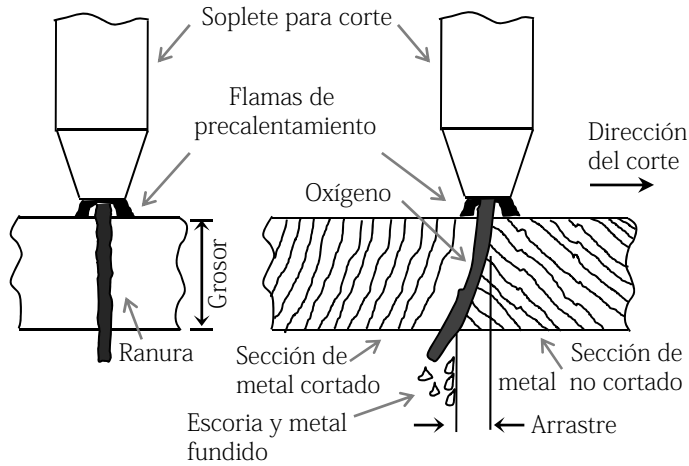


Figura 2.10: Principio de operación del oxicorte [Schrade 2000].

hidrógeno, propano, hulla, tetreno o crileno), cuyo efecto es producir una llama para calentar el material, mientras que como gas comburente siempre ha de utilizarse oxígeno a fin de causar la oxidación necesaria para el proceso de corte.

Bien sea en una única cabeza o por separado, todo soplete cortador requiere de dos conductos: uno por el que circule el gas de la llama calefactora (acetileno u otro) y uno para el corte (oxígeno). El soplete de oxicorte calienta el acero con su llama carburante, y a la apertura de la válvula de oxígeno provoca una reacción con el hierro de la zona afectada que lo transforma en óxido férrico (Fe_2O_3), que se derrite en forma de chispas al ser su temperatura de fusión inferior a la del acero.

La principal función de la llama de precalentamiento es llevar la pieza hasta la temperatura de ignición. No obstante, la llama de precalentamiento tiene otras funciones:

- Limpia la superficie de la pieza a cortar de cualquier sustancia extraña como óxido, suciedad, escamas, no sólo durante el precalentamiento sino también durante la acción de corte.
- Ayuda a alcanzar la temperatura de ignición a medida que se avanza con el corte.

- Mantiene un entorno de protección alrededor del chorro de O_2 de corte.
- Precalienta el O_2 contenido en el chorro de corte haciéndolo más reactivo.
- Ayuda a mantener las escorias producidas en la ranura del corte en estado fluido para que puedan ser expulsadas.

El soplete de corte juega tres papeles distintos: llevar el Fe contenido en el acero a su temperatura de ignición, aportar una atmósfera envolvente con una proporción mayor que la mínima necesaria en O_2 y, por último, generar el agente iniciador.

Para lo primero el soplete de corte utiliza parte del O_2 disponible para mezclarlo con el gas combustible y así crear la llama de precalentamiento formada por un anillo de llamas en la boquilla de corte. La llama de precalentamiento puede alcanzar temperaturas entre $2.425\text{ }^\circ\text{C}$ y $3.320\text{ }^\circ\text{C}$ dependiendo del tipo de gas utilizado y la riqueza de O_2 en la mezcla [ESAB 2006]. La proporción de O_2 y gas en la mezcla para el precalentamiento se controla a través de las dos válvulas que incorpora el soplete. Con la llama de precalentamiento bien ajustada, se acerca ésta a la pieza a cortar hasta que se alcanza la temperatura de ignición.

2.5.2. Características del Oxicorte

Para conseguir la mejor calidad en el corte, siempre deben observarse las recomendaciones del fabricante de los equipos de corte referentes al tamaño de la boquilla en función del grosor de chapa a cortar, ajuste de la llama de precalentamiento, presión de gas, presión de O_2 de corte, y velocidad de corte. Si se siguen correctamente las recomendaciones se conseguirá un corte adecuado:

- Caras de corte perpendiculares con unas aguas suaves.
- Ausencia de mordeduras.
- Canto superior anguloso, ni redondeado ni fundido.
- Canto inferior libre de escorias y rebabas.

La pureza del O_2 debe ser del 99,5% o superior. Una pérdida de pureza de un 3,1% implica una pérdida de velocidad de avance de aproximadamente un 25% y a su vez incrementa el consumo de O_2 en aproximadamente un 25%. Con una pureza de O_2 de un 95% la acción de corte por oxidación es imposible

de conseguir y se transforma en una acción de fusión y limpieza [Lyttle 2001].

La propiedad de los óxidos de *Fe* de fundir a temperaturas semejantes al *Fe* atómico hace posible el fenómeno del oxicorte. Esta propiedad es excepcional, puesto que la mayoría de los metales funden a temperaturas menores que sus óxidos. Precisamente por éste motivo metales como el *Al*, *Mg* o *Cr* no pueden ser cortados por este proceso dado que sus óxidos funden a una temperatura mucho mayor que su fase atómica.

Es por ello que la aplicación fundamental de oxicorte, y para la cual está diseñado, es el corte de aceros de bajo contenido en Carbono (normalmente entre 0,1 % y 0,3 %) y bajo contenido en aleantes. La presencia en altas concentraciones de los aleantes normalmente presentes en el acero afecta a la capacidad del proceso de cortar el metal [Rico 2002]. Otras aleaciones bajas en hierro y algunos metales no ferrosos pueden también ser cortados con este proceso, aunque la calidad de corte no será tan alta como en el corte de los aceros. Los aceros inoxidable, los de aleación alta, el hierro de molde, y las aleaciones de níquel, no se oxidan fácilmente y no proporcionan bastante calor para una reacción continua.

Este proceso tiene la ventaja de cortar espesores de material considerables de hasta 750 *mm*. Con materiales resistentes a la oxidación como el acero inoxidable se añade un flux al chorro de oxígeno para producir una reacción exotérmica [Craig 1996].

La máquina de oxicorte consta de un pórtico sobre el que se monta el soplete, de forma que su velocidad de desplazamiento es constante y se mantiene invariablemente a la altura e inclinación correcta, condiciones esenciales para obtener cortes limpios y económicos. Normalmente se controlan también las presiones de todos los gases. Hay muchos modelos de máquinas de oxicorte, desde la máquina portátil, que se apoya y se desplaza sobre la chapa, hasta la máquina fija, con una o varias cabezas de corte, capaces de cortar chapas de espesores muy diversos.

No obstante, cada día es más común la incorporación del control numérico (CN) a la máquina de oxicorte, de tal forma que la geometría y los parámetros tecnológicos se introducen en el CN en forma de un programa codificado. La instalación de una máquina de oxicorte, aún dotada de control numérico, no es muy costosa en comparación con otros procesos de corte de chapa, alrededor de 85000 euros [Hahn 2009].

El oxicorte permite realizar todo tipo de cortes rectilíneos y curvos sobre chapas de acero de cualquier espesor, o sobre perfiles, tubos, etc. Pueden cortarse en buenas condiciones chapas superpuestas, incluso muy delgadas, si están bien sujetas unas contra otras. Cuando el soplete está bien regulado (presión, mezcla y velocidades adecuadas), los cortes son uniformes y presentan buen aspecto; basta un posterior y sencillo desbarbado para obtener un acabado aceptable.

Fallos Comunes en el Oxicorte¹.

Técnica de corte correcta. La superficie de corte es lisa y uniforme y, con la ranura de corte paralela. Las líneas de rastreo son casi verticales. Hay poca escoria adherida a la parte inferior del filo. El borde superior está ligeramente redondeado cuando las llamas de precalentamiento están correctamente ajustadas.

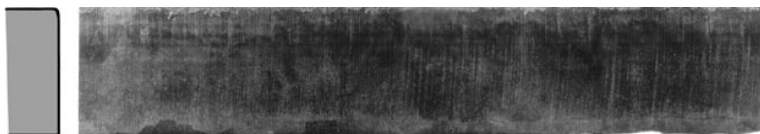


Figura 2.11: Técnica de oxicorte correcta.

Velocidad de corte muy baja. Una velocidad de corte anormalmente baja, da como resultado una superficie de corte pesada e irregular con escoria adherida en forma de glóbulos de gran tamaño. Bajo esta condición tanto el oxígeno como el gas combustible están siendo desperdiciados.

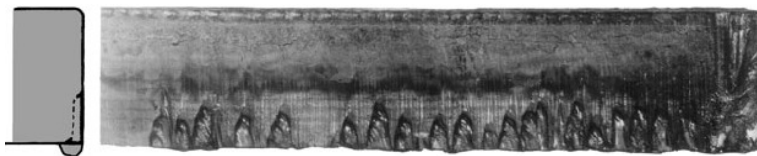


Figura 2.12: Velocidad de oxicorte muy baja.

Velocidad de corte muy elevada. Una velocidad de corte extremadamente alta da como resultado líneas de rastreo curvadas en la superficie de corte, como se muestra en la Figura 2.13. La cara es bastante suave, pero

¹Adaptado de [ESAB 2006]

algo cóncava. La escoria se adhiere durante el corte, pero se puede quitar con facilidad.



Figura 2.13: Velocidad de oxicorte muy elevada.

Boquilla Demasiado lejos. Cuando la boquilla de corte se coloca muy lejos sobre la pieza, se produce un excesivo redondeo en parte superior de la cara. La velocidad de corte también podría verse reducida. Con la correcta holgura entre la pieza y la boquilla, la flama de precalentamiento no debería estar $6,35\text{ mm}$ por encima de la superficie de la pieza de trabajo.

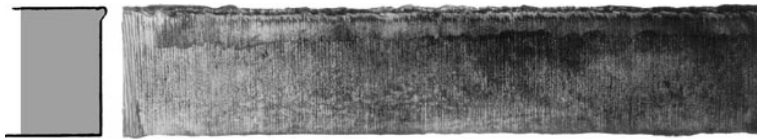


Figura 2.14: Boquilla de oxicortes demasiado lejos.

Boquilla demasiado cerca. Cuando la boquilla de corte se coloca demasiado cerca de la pieza de trabajo, parte del cono interior de la llama de precalentamiento comienza a quemar la pieza en los extremos del corte. Esto produce surcos en la cara cortada y un derretimiento excesivo en las orillas.

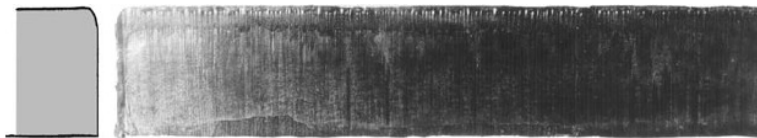


Figura 2.15: Boquilla de oxicorte demasiado cerca.

Exceso de oxígeno en el corte. Si la presión del oxígeno de corte es demasiado alta o el tamaño de la boquilla demasiado grande, resultará en una reducción en la calidad de corte. Las boquillas están hechas para operar dentro de un rango limitado de presiones, por lo tanto, la presión de

oxígeno excesiva provoca distorsiones en el flujo de oxígeno una vez que éste deja la boquilla.

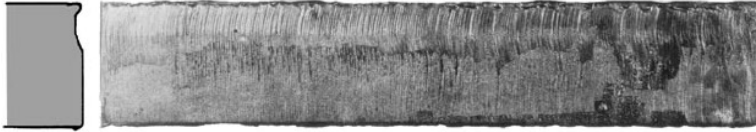


Figura 2.16: Exceso de oxígeno en el oxicorte.

Flama de precalentamiento excesiva. Los operadores sin experiencia a menudo tratan de aumentar las velocidades de corte utilizando una llama de precalentamiento muy alta. El precalentamiento excesivo provoca la fusión de la parte superior y de hecho puede disminuir la velocidad de corte. Además, el oxígeno y el gas combustible se desperdician.

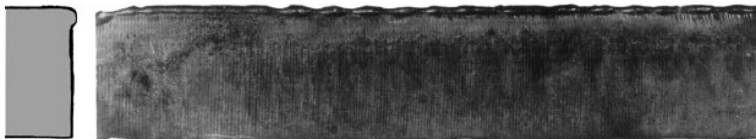


Figura 2.17: Oxicorte con flama de precalentamiento excesiva.

Boquilla sucia. Cuando alguna impureza ha ensuciado la boquilla de corte, el flujo de oxígeno pierde su forma paralela. La superficie de corte ya no es lisa y cuadrada, y aparecen picaduras, sarro y una gran cantidad de escoria. La boquilla deberá ser limpiada con precaución, para no distorsionar el orificio de salida del oxígeno.



Figura 2.18: Boquilla de oxicorte sucia.

2.6. Corte por Plasma

El plasma es considerado el cuarto estado de la materia, después del sólido, líquido y gaseoso [Gurnett 2005, Mankova 2000]. El plasma consiste en un con-

glomerado de iones positivos, átomos neutros y electrones libres, obteniéndose por calentamiento de gases hasta temperaturas muy elevadas. En los cambios de estado de la materia interviene una cierta cantidad de calor, calor latente de la transformación.

Los tres primeros estados de la materia son sólido, líquido y gaseoso. En el caso del agua, por ejemplo estos estados son el hielo, el agua y el vapor. Al aplicarse energía calorífica, el hielo se transforma de sólido a líquido, y si se aplica aún más calor, se convierte en gas. Al aplicarse una considerable cantidad de calor a un gas, este se transforma en plasma [Lima 2004]. Añadiendo energía a un gas puede entrar en un estado de ionización que le confiere unas características de condición térmica y conducción eléctrica muy elevadas.

En los años sesenta se detectó un campo de aplicación muy importante de estos aspectos para el corte de metales. Se pensó que un gas en estado de plasma se podría restringir a través de un pequeño orificio o boquilla, estableciendo un arco en el electrodo que va acompañando a la boquilla, el polo negativo, y a la chapa a cortar el polo positivo [Martin 2003]. De esta forma se genera un arco con propiedades térmicas especiales en las que es posible alcanzar los 30.000 °C en el centro. Teniendo en cuenta que el gas de aporte entra a una presión determinada, también tiene la aplicación de poder alejar el material fundente. Ésta sería la base del plasma como herramienta de corte.

2.6.1. Componentes Básicos y Principio de Operación

El corte por plasma es un proceso que utiliza una boquilla para estrangular un gas ionizado a alta temperatura para que pueda fundir y cortar secciones de metales conductores de electricidad (Figura 2.19) [Itatani 2008]. Un gas eléctricamente conductivo (plasma) se utiliza para transferir energía negativa suministrada por una fuente de energía eléctrica a partir de un soplete de plasma hacia el material a cortar.

Los cuatro componentes principales del sistema de corte por plasma son: la fuente de alimentación, el circuito de inicio, el control de flujo de gas, y la antorcha. La antorcha sirve de soporte para las piezas consumibles y proporciona refrigeración (ya sea de gas o agua) a estas partes. La boquilla y el electrodo se contraen y mantienen el chorro de plasma.

A fin de iniciar el proceso de corte por plasma, una señal de arranque se envía a la fuente de alimentación de CD, esto al mismo tiempo activa el voltaje de circuito abierto y el flujo de gas a la antorcha. Después de que el flujo de

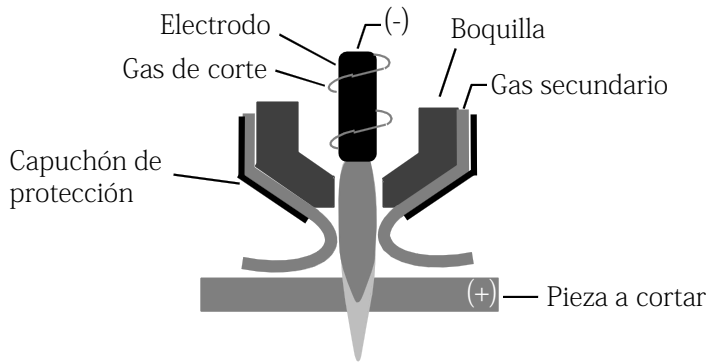


Figura 2.19: Corte por plasma [Hyper 2007].

gas se estabiliza, un circuito de alta frecuencia se activa. La alta frecuencia se rompe entre el electrodo y la boquilla dentro de la antorcha, y el arco hace que el gas pase a través de ella para ser ionizado. Este gas eléctricamente conductivo crea una ruta actual entre el electrodo y la boquilla, lo que da como resultado la formación de un arco piloto. Cuando el arco piloto se pone en contacto con la pieza de trabajo, se pegará a esta pieza. El arco de plasma funde el metal, y el gas de alta velocidad elimina el material fundido (Figura 2.20).

2.6.2. Tipos de Corte por Plasma

Plasma Convencional

Ambos sistemas de plasma de oxígeno y nitrógeno (cuando se opera apropiadamente) son capaces de cortar materiales (aceros al carbono, aluminio, y aceros inoxidable) de 9.5 mm hasta 40 mm . La capacidad de cortar más espesor en sistemas de plasma convencionales varía dependiendo del fabricante del sistema y niveles de potencia. En términos generales, los sistemas de plasma son capaces de cortar aluminio de 150 mm de grosor, acero inoxidable de 125 mm de grosor, y aceros al carbono de 32 mm de grosor. Indudablemente es posible cortar secciones más gruesas de acero al carbono, pero el proceso no es económicamente ventajoso cuando se compara con el proceso de oxicorte.

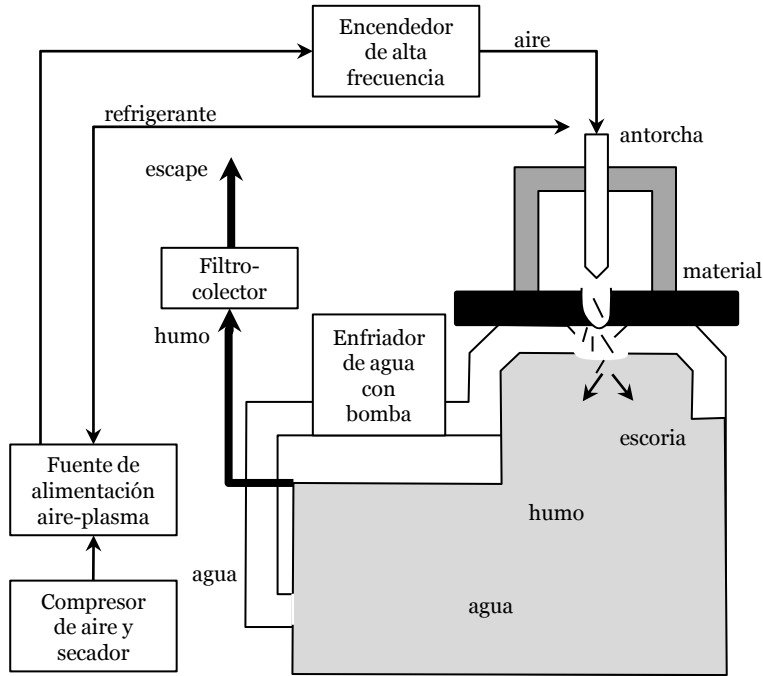


Figura 2.20: Principio de operación del corte por plasma [Hugh 2006].

Plasma de Alta Definición

El plasma de alta definición es un proceso que mejora la calidad de corte y escuadra al canto de materiales de menos de 10 *mm*. Este desarrollo se ha logrado incrementando la densidad de energía de un plasma en 40000 o 60000 $\frac{A}{in^2}$. Esto es un aumento muy importante sobre la densidad de energía de plasma convencional de 12000 a 20000 $\frac{A}{in^2}$.

La alta definición al igual que los otros sistemas de plasma produce la mejor calidad dentro de ciertos grosores y tipos de material. Es también importante recordar que no es posible producir cortes sin rebaba y de buena calidad, si el dispositivo de control de movimiento es inadecuado. El control de movimiento debe tener unas características de aceleración y desaceleración excelentes, gran fluidez en los desplazamientos libre de vibraciones, junto con especificaciones de exactitud y repetibilidad que superen a los dispositivos convencionales.

Los parámetros como velocidad, altura de corte, presiones de gas y pureza deben ser mantenidos de acuerdo a las especificaciones para aprovechar por completo las cualidades de la alta definición. Un ejemplo son los aceros al carbono de espesor de 9 a 25 *mm*, o los aluminios los cuales pueden ser cortados con este sistema.

2.6.3. Características del Corte por Plasma

El plasma corta cualquier elemento metálico, incluso metales no férricos como el titanio. En este sentido tiene un campo de aplicación total. En el caso del acero inoxidable o de aluminio la comparativa frente al láser en cuanto a calidad resulta inferior. Frente a la actual limitación de láser a nivel de corte hoy es posible cortar con un plasma más de 100 *mm* de acero inoxidable [Martin 2003]. En acero al carbono y frente al oxicorte, el plasma ha ido avanzando año tras año. En lo que se entendía hace años como espesores absolutamente limitados para el oxicorte, el plasma, a nivel de rentabilidad y de velocidad de corte, incluso de costes de procesos, va ganando terreno.

Existen cuatro factores que se utilizan para determinar la calidad de corte: el ángulo de bisel, los niveles de escoria, aspecto del corte, líneas de rastreo. El operador sólo puede ajustar dos parámetros para mejorar la calidad, los cuales son: la altura del soplete y la velocidad de corte. Respecto a la calidad de corte, en el marco de los tres métodos térmicos (plasma, láser y oxicorte), el plasma es el que más acusa cualquier alteración o variación en todos los parámetros que puedan afectar la calidad. Estos parámetros pasan primero por el corte mecanizado y la máquina como la mano que guía el elemento cortante. El plasma es un elemento que no sólo acusa cualquier imperfección mecánica, sino que la aumenta. Si la conicidad del plasma no coincide con el posicionamiento de la chapa, esa será la conicidad que refleje la chapa cortada.

Los sistemas tradicionales de plasma con nitrógeno tienen una densidad de energía en un rango de 12000 a 20000 amperios por pulgada cuadrada ($\frac{A}{in^2}$), esta densidad de energía ha sido determinada por factores económicos. En otras palabras si se incrementa la densidad de energía cambiando el amperaje con respecto a la proporción de orificio de boquilla, el electrodo y la boquilla (artículos de consumo) se gastarán de un modo inaceptable, incrementando por lo tanto el coste del proceso.

Aunque la alta densidad causa mejor calidad de corte, esta se obtiene a un coste inaceptable. Debido a esto, los fabricantes de plasma han tenido que diseñar sus sistemas de plasma para operar con una calidad de corte correcta,

combinando un aceptable nivel de vida del consumible.

Gases para Plasma

El gas para plasma o gas de corte, es el gas ionizado en el proceso de corte el cual sale por el orificio de la boquilla. Los gases para plasma que son utilizados son: aire, nitrógeno, oxígeno, argón-hidrógeno. El gas de protección o gas de aporte, es el gas secundario en el proceso de plasma. Envuelve el arco, se utiliza para ayudar a precisar y a enfriar la antorcha y crea el entorno de corte, el cual entre otras cosas afecta la calidad de borde del corte. El gas de protección debe ser seleccionado de acuerdo con el gas plasma de forma tal que la combinación ofrezca capacidad de refrigeración sin pérdida de rendimiento del proceso. Los gases que se utilizan como gas de aporte secundario son: aire, aire-metano, CO_2 , nitrógeno, oxígeno-nitrógeno y metano.

Cualquier gas o mezcla de gases que no degrade las propiedades del electrodo de tungsteno o de la pieza de trabajo puede servir como un gas de plasma. La mezcla de gas varía de acuerdo con los criterios de diseño del equipo de plasma. El más utilizado es el aire comprimido [Craig 1996]; todos los metales comunes, tales como carbono y aceros de aleación, acero inoxidable y aluminio, se pueden cortar con aire comprimido. A medida que aumenta el espesor del metal, o cuando la carga de trabajo es muy pesada, un cambio de aire comprimido a nitrógeno con gas de aporte de CO_2 prolonga la vida de los consumibles. De igual manera, la calidad de corte del aluminio se mejora con el argón-hidrógeno y nitrógeno como gas de protección.

La selección del gas correcto es fundamental para la operación adecuada del sistema de corte, así para la calidad óptima. La presencia de contaminantes como impurezas del gas, humedad, contaminantes del sistema de tubos o gas inapropiado puede causar fallas de encendido, baja calidad, o reducción de la vida útil de los consumibles. De forma general, para conseguir características específicas en el corte, la selección del gas se realiza en función del tipo de metal a cortar y su espesor, la Tabla 2.3 muestra diversas posibilidades a utilizar.

Velocidades de Corte

Unos de los puntos importantes a la hora de evaluar una máquina de plasma son las velocidades con las que se va a mover el proceso. En situaciones exageradas, con un plasma de 200 amperios es posible cortar chapas de 40 mm a 300 $\frac{mm}{min}$ e incluso menos, pero también podrá cortarse chapa de pocos milímetros a 8.000 y 10.000 $\frac{mm}{min}$. Esto ofrece un margen de aplicaciones muy amplio en

2.6. Corte por Plasma

cuanto a velocidad.

La situación más desfavorable en cuanto al corte es que la velocidad máxima no pueda ser la que marque la máxima velocidad de posicionamiento de la máquina, pues es preciso otorgar un cierto margen de movimiento. Además, todo lo que sea aumentar la velocidad de posicionamiento de la máquina supone mayor productividad del sistema.

Tabla 2.3: Selección de gases para el proceso de plasma [Ferre 2008].

Material	Gas utilizado	Características del corte
	Plasma/Protec	
Acero al carbono	Oxígeno / Oxígeno	Solo espesores menores a 6 mm, excelente acabado, sin escoria, máxima vel., excelente soldabilidad.
	Oxígeno / Aire	Espesores de 0,5 a 38 mm, excelente acabado, sin escoria, máxima vel., excelente soldabilidad.
	Aire / Aire	Espesores de 0,5 a 38 mm, buen acabado, sin escoria.
Acero inoxidable	H35 / Nitrógeno	Sólo espesores mayores a 10 mm, acabado color dorado, máxima vel., excelente soldabilidad.
	H35+Nitrógeno / Nitrógeno	Sólo espesores mayores a 10 mm, acabado color plateado (óptimo), alta duración de consumibles, excelente soldabilidad.
	Nitrógeno / Nitrógeno	Espesores de 0,5 a 38 mm, acabado intermedio (negro), alta duración de consumibles.
	F5 / Nitrógeno	Sólo espesores mayores a 10 mm, acabado brillante, alta duración de consumibles, excelente soldabilidad.
	Aire / Aire	Acabado pobre (negro), menor duración de consumibles.
Aluminio	H35 / Nitrógeno	Sólo espesores mayores a 12 mm, superficie suave, máxima vel., alta duración de consumibles.
	Aire / Aire	Superficie algo rugosa, menor duración de consumibles.

Por regla general, las máquinas se pueden estar moviendo también entre $15 \frac{m}{min}$ y $40 \frac{m}{min}$, dependiendo también, por supuesto, de la longitud de la

2.7. Tabla Comparativa de Procesos de Corte

Tabla 2.4: Velocidades de corte para máquinas de corte por plasma en acero inoxidable: $\frac{m}{min}$ ($\frac{in}{min}$).

A	Grosor de la Chapa mm (<i>in</i>)							
	1,5 ($\frac{1}{16}$)	3 ($\frac{1}{8}$)	6 ($\frac{1}{4}$)	9 ($\frac{3}{8}$)	13 ($\frac{1}{2}$)	25 (1,0)	50 (2,0)	75 (3,0)
30	0,75-1,5 (30-60)	0,5-0,75 (20-30)	0,13-0,25 (5-10)					
50	1,5-3 (60-120)	1,3-2,5 (50-100)	0,6-1,3 (25-50)	0,13-0,25 (5-10)	0,025-0,13 (1-5)			
100		1,5-2,8 (60-110)	0,75-1,5 (30-60)	0,5-1 (20-40)	0,4-0,5 (15-20)	0,13-0,25 (5-10)		
400		3-4 (120-150)	4-4,3 (150-170)	3-3,5 (120-140)	2,5-3 (100-120)	1-1,5 (40-60)	0,25-0,5 (10-20)	0,08-0,2 (3-8)

rodadura y de otros factores. La Tabla 2.4 muestra diversas velocidades de corte para máquinas de cortes por plasma en acero inoxidable.

2.7. Tabla Comparativa de Procesos de Corte

Tabla 2.5: Tabla comparativa de procesos de corte, adaptada de [Bystro 2010].

Característica	Agua + abrasivo	Láser	Plasma	Oxicorte
Espesor del material	++	-	+	++
Calidad de corte	++	++	-	-
Velocidad de corte	+	++	+	+
Utilización universal	++	-	+	-
Precisión de corte	++	++	+	-
Post-procesado	++	++	+	-
Escoria	+	-	-	+
Flexibilidad	++	+	-	-
Tiempo total de proceso	+	++	-	-

2.8. Conclusiones del Capítulo

La viabilidad de utilización de un proceso no sólo depende de la capacidad de producción o de la máquina para elaborar la pieza. Los procesos presentados son económicamente viables y óptimamente altos sólo si se utilizan dentro de

2.8. Conclusiones del Capítulo

los límites o parámetros establecidos por el fabricante, así con los materiales, espesores y otros parámetros de la pieza.

Los procesos de corte por chorro presentan, de forma similar a lo que sucede en otros procesos como el mecanizado por arranque de material, unos parámetros tecnológicos críticos que son necesarios controlar para obtener los acabados superficiales y las tolerancias dimensionales requeridas. Para los procesos menos extendidos como el láser, cabe decir que todavía hoy se siguen probando nuevas combinaciones de parámetros tecnológicos en función de aquellos materiales (ya sean nuevos o mejorados) susceptibles de ser cortados por estos métodos.

En cuanto al oxicorte e incluso el corte por plasma, adecuados para la mayoría de los aceros de construcción, aceros de fundición y aceros aleados (incluso inoxidable), son procesos relativamente sencillos con pocas variables a controlar. A pesar de ello, el número de empresas que optimizan realmente esas pocas variables es muy reducido, creando una falsa idea de que son procesos donde no se pueden conseguir buenos acabados ni mucho menos pequeñas tolerancias (del orden de 1 *mm*).

Bibliografía

- Amiss 2004** Amiss J., Jones F. and Ryffel H. “Manufacturing Processes,” Machinery’s Handbook, Edición 27, Industrial Press, pp. 1443, 2004.
- Baschs 1988** Bachs L., Cuesta J. and Carles N. “Aplicaciones Industriales del Láser,” Editorial Marcombo, 1 edición, 1988.
- Bened 1987** Benedict G. “Non Traditional Manufacturing Processes,” Marcel Dekker Inc., pp. 19–36, 1987.
- Bystro 2010** Bystronic “Waterjet cutting: An alternative production technology,” pp. 1-12, 2010.
- Craig 1996** Craig E. “Thermal Cutting,” ASM Handbook Forming and Forging, Vol. 14, Cuarta Edición, ASM International, pp.1567–1596, 1996.
- Dahotre 2008** Dahotre N. and Harimkar S. “Laser Fabrication and Machining of Materials,” Springer Science, pp.144–206, 2008.
- Dorron 1999**
- Dorron 2001** Dorronsoro M. “La Tecnología Láser: Fundamentos, Aplicaciones y Tendencias,” Vol. 12, Editorial Mc Graw-Hill, 2001.
- Einstein 1917** Einstein A. “On the Quantum Theory of Radiation,” Physikalische Zeitschrift 18, pp. 121–128, 1917.
- ESAB 2006** ESAB Welding & Cutting Products. “Factors Affecting Quality in Oxy-Fuel Cutting,” Operators Manual 0558006464, pp. 1–45, 2006.
- FBN 2002** FBN Metal Products Inc. “Waterjet Cut Qualities,” Copyright 2002.
- Ferre 2008** Ferrero S. “Corte por Plasma de Alta Definición,” *Metalmecánica*, Ed. 3, Vol. 13, pp S2–S12, 2008.
- Flow 2002** Flow International Corporation. “Waterjet Seminar,” Flow International Corporation, pp. 1–30, Copyright 2002.
- Gidley 2009** Gidley R. “Basic Waterjet Principles,” Waterjets.org, 2009.
- Groover 2007** Groover P. “Fundamentals of Modern Manufacturing Materials, Processes, and Systems,” John Wiley & sons Inc., 3 Ed., pp. 618–646, 2007.

- Gurnett 2005** Gurnett D. and Bhattacharjee A. “Introduction to Plasma Physics: With Space and Laboratory Applications,” Cambridge University Press, pp. 2, 2005.
- Hahn 2009** Hahn J., Julian A., Maier C., Neff R. and Schneider R. “Entendiendo las Tecnologías de Corte de Metal,” The Fabricator, Copyright 2009.
- Hugh 2006** Hugh J. “Manufacturing Processes,” Engineer on a Disk, pp. 406-420, Copyright 1993–2006,.
- Hyper 2007** “Guía de referencia para trabajar con máquinas de corte por plasma,” Copyright Hypertherm Inc., Revisión 4803643 Español / Spanish, pp. 1–28, 2007.
- Itatani 2008** Itatani R. “Advanced Plasma Technology, remark on Production of Atmospheric Pressure Non-thermal Plasmas for Modern Applications,” Origin of Activities of Plasmas, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co, pp.371–381, 2008.
- Kannat 2009** Kannatey-Asibu E. “Principles of Laser Materials Processing,” John Wiley & Sons Inc., pp. 431–499, Copyright 2009.
- KMT 2005** KMT Waterjet Systems “Corte con Agua, una Tecnología en Auge,” pp. 1–15, Copyright 2005.
- KMT 2009** KMT Waterjet Systems “Cabezal de Corte con Abrasivo Active Autoline I, una Solución Fácil para un Rendimiento Óptimo,” pp. 2, Copyright 2009.
- Lima 2004** Lima E. “Corte a Plasma,” Revista da Soldagem, Año II, No. 9, pp. 18–26, 2004.
- Lyttle 2001** Lyttle B., Garth W. and Guimaraes A. “Selecting the Proper Fuel Gas for Cost-Effective Oxyfuel Cutting,” Praxair Technology, Inc., Reprinted from the Welding Journal July 1997, pp. 35–38, Copyright 2001.
- Mankova 2000** Manova I. “Progressive Technologies,” Viena Kosice, pp. 225–240, 2000.
- Martin 2003** Martínez F. “Corte de Chapa por Plasma,” Simposium sobre Corte de Chapa de Maquitect, 2003.
- Mcguir 2006** Mcguire D. “High Impact Waterjet Nozzle,” United States Ultrastrip Systems, Inc, Patent Number 7100844, 2006.

- Ortega 2007** Ortega D. “Proyecto de Implantación de una Empresa de Corte por Agua y Láser,” Treballs Academics UPC, Master Thesis, pp. A3, 2007.
- Ready 1997** Ready J.F. “Industrial Applications of Lasers,” Academic Press, San Diego CA, 1997.
- Rico 2002** Rico J., Valiño G., Cuesta E. and Villanueva A. “El Corte de Chapa Mediante Oxicorte (1 parte),” Equipos y Tecnologías para Corte de Chapa, 2002.
- Schrade 2000** Schrader G., Elshennawy A. and Doyle L. “Other Cutting and Joining Processes,” Manufacturing Processes & Materials, Society of Manufacturing Engineers, pp. 335–351, 2000.
- Schuo 1987** Schuocker D and Muller P. “Dynamic Effects in Laser Cutting and Formation of Periodic Striations,” Proceedings of SPIE, pp. 258-264, 1987.
- Sylvia 1996** Sylvia J. “Abrasive Waterjet Cutting,” ASM Handbook Forming and Forging, Vol. 14, Cuarta Edición, ASM International, pp.1619–1650, 1996.

Capítulo 3

Metodologías para la Selección de Procesos de Fabricación

3.1. Introducción

La elección de un proceso de fabricación, involucra decisiones que ejercerán gran influencia sobre la calidad y costes del producto final. Tales medidas afectan el éxito del producto por lo que existen factores que deben de ser tomados en consideración [Swift 2003]. Antes de cualquier decisión, se debe tener acceso a las correctas fuentes de información y documentación, ya que uno de los principales factores que influyen en dicha selección depende del conocimiento que se tenga de los diferentes procesos. Por lo regular, la selección de un proceso, sólo se limita a aquellos que son bien conocidos [Manoc 2008] o tradicionalmente utilizados.

La preselección es un requisito previo para la selección del equipo, selección que tradicionalmente ha sido llevada a cabo utilizando los conocimientos generales y experiencia, sin embargo, con un número cada vez mayor de procesos y sub-procesos, es necesario desarrollar un método de selección elaborado y sistemático que tenga en cuenta factores, tales como materiales y diseño del producto, y que al mismo tiempo cumpla con los límites de capital y operación.

Una metodología de selección permite hacer frente a un problema exponiendo claramente cuáles son los aspectos que se consideran de relevancia, e

identificando los procesos factibles de acuerdo a los requerimientos de la pieza, eliminando aquellos que no cumplen éstas restricciones.

En este capítulo se presentan y analizan diversas metodologías utilizadas para la selección de procesos, se describen brevemente las características principales de cada una de ellas enfatizando las principales ventajas que presentan y sus áreas de mejora.

3.2. Resumen del Capítulo

Las Secciones 3.3 a 3.6 presentan las metodologías de selección PRIMA, Ashby, Halevi y Dieter. En 3.7 se destacan los Centros de Investigación como apoyo en la selección de procesos. Enseguida en la Sección 3.8 se muestran dos Métodos de Evaluación Multi Criterio: el Topsis y AHP. La Sección 3.9 presenta diversas calculadoras de corte disponibles en línea. Finalmente las conclusiones se presentan en la Sección 3.10.

3.3. Mapas de Información de Procesos PRIMAs .

La metodología de selección PRIMA (*PRocess Information MApp*s), o mapas de información de procesos, inicialmente propuesta en 1982 por P. Dargie [Dargie 1982], es una matriz que contiene información de diferentes áreas de conocimiento como materiales, diseño, calidad, costes, fundamentos y variantes. La información no sólo involucra consideraciones relevantes a los procesos respectivos, sino también muestra una visión general de las características funcionales, a fin de alcanzar un entendimiento mayor. Dentro de este formato, se proporciona un nivel similar de detalle en cada proceso incluido. Primeramente, se proporciona un perfil del proceso en sí mismo, su funcionamiento y bajo qué circunstancias se considera una óptima selección. En segundo lugar se muestra un resumen de lo que el proceso puede hacer, sus limitaciones, y una visión general de consideraciones de calidad, incluyendo esquemas de capacidad del proceso para tolerancias relacionadas a dimensiones características. La Figura 3.1 muestra un diagrama general del proceso de selección de la metodología PRIMA.

Las PRIMAs están divididas en siete categorías que cubren las características y capacidades de los procesos [Santos 2001]:

1. **Descripción del proceso.** Explicación de los fundamentos del proceso,

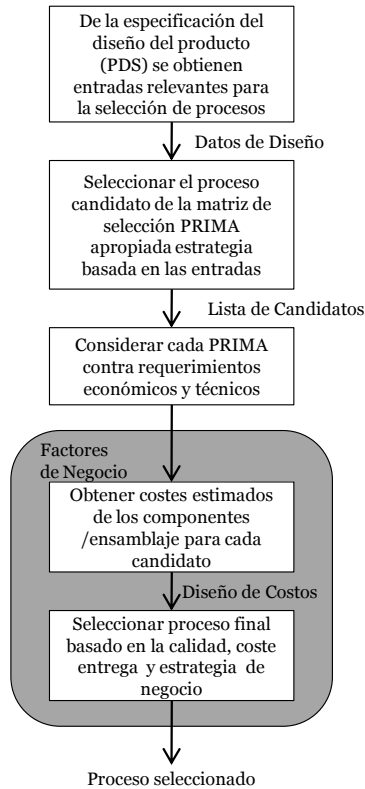


Figura 3.1: Diagrama general del proceso de selección de la metodología PRIMA.

junto con una representación esquemática de su operación y una parte terminada.

2. **Materiales.** Descripción de los materiales recomendados para el proceso dado.
3. **Variaciones del proceso.** Descripción de cualquier variación del proceso básico y cualquier punto especial relacionado con estas variaciones.
4. **Consideraciones económicas.** Lista de puntos importantes como el coste de producción, la cantidad de producción mínima, costes de herramientas, costes de trabajo, tiempo de espera, y cualquier otro punto que pueda ser de importancia específica al proceso.

5. **Aplicaciones típicas.** Componentes o montajes que satisfactoriamente han sido fabricados usando el proceso.
6. **Aspectos de diseño.** Cualquier punto, oportunidades o limitaciones que son relevantes al diseño.
7. **Calidad.** Información que incluye un esquema de capacidades del proceso, así como cualquier información sobre defectos comunes.

3.3.1. Selección de Procesos por PRIMAs.

Inicialmente se debe de elegir el tamaño de lote o número de piezas a producir. Para pequeñas series se considera una cantidad de 1-100 piezas. Las series de muy bajo volumen de 100 a 1,000, considerándose las de bajo volumen a 1,000 a 10,000, volumen medio de 10,000 a 100,000, y alto volumen más de 100,000 piezas [Swift 2006].

Una vez que el número de piezas sea elegido, se debe seleccionar el material que satisfaga las demandas de diseño, utilizando la tabla de la matriz de PRIMAs mostrada en la Tabla 3.1, la cual indica el tipo de procesos disponibles de acuerdo a las especificaciones anteriormente mencionadas.

Para seleccionar el candidato a utilizar, es necesario considerar aspectos económicos y de ingeniería como: comprender cada uno de los procesos y sus variaciones, comparar la compatibilidad del material, analizar las tolerancias y exigencias superficiales con la capacidad del proceso, considerar los costes de los procesos estimados, así como evaluar posibles alternativas, y por último repasar el proceso seleccionado contra las exigencias del negocio.

3.3.2. Revisión de Metodología PRIMA

El uso de la matriz PRIMA para la selección de procesos es una alternativa viable que permite elegir de manera rápida y fácil un proceso o alternativas de procesos basándose solamente en la cantidad de producción y en el material que se desea utilizar. Sin embargo debe tomarse en cuenta ciertas limitantes en el uso de la matriz para la aplicación de procesos no convencionales ya que no son propuestos como primera opción aún cuando éstos puedan cumplir con los requerimientos de la pieza.

La selección obtenida será una lista de procesos pero no existe una forma cuantitativa de comparación entre ellos, es decir, el usuario debe de elegir entre

los procesos propuestos de acuerdo a la experiencia y conocimiento previos que posea.

3.3. Mapas de Información de Procesos PRIMAs .

MATERIAL	HIERRO	ACERO (CARBÓN)	ACERO (ALEACIÓN)	ACERO INOX	CORREY ALEACIÓN	ALUMINIO Y ALEACIÓN	MAGNESIO Y ALEACIÓN	ZINCO ALEACIÓN	ESTAÑO ALEACIÓN	PLOMO Y ALEACIÓN	NIQUEL Y ALEACIÓN	TITANIO Y ALEACIÓN	TERMOPLÁSTICOS	TERMOESTABLES	COMPUESTOS FR	CERÁMICOS	METALAS REFRACTARIAS	METALAS	PRECIOSOS
Metales 100 a 100.000	[1.5][1.6] [1.7][1.8] [1.9]	[1.5][1.7] [1.8][1.9] [1.10]	[1.5][1.7] [1.8][1.9] [1.10]	[1.5][1.7] [1.8][1.9] [1.10]	[1.5][1.7] [1.8][1.9] [1.10]	[1.5][1.7] [1.8][1.9] [1.10]	[1.5][1.7] [1.8][1.9] [1.10]	[1.5][1.7] [1.8][1.9] [1.10]	[1.5][1.7] [1.8][1.9] [1.10]	[1.5][1.7] [1.8][1.9] [1.10]	[1.5][1.7] [1.8][1.9] [1.10]	[1.5][1.7] [1.8][1.9] [1.10]	[2.5] [2.7] [2.8]	[2.5] [2.7] [2.8]	[2.2] [2.3] [2.4]	[1.5] [1.6] [1.7]	[1.1] [1.2] [1.3]	[1.4] [1.5] [1.6]	[1.8] [1.9] [2.0]
Baja 100 a 100.000	[1.2][1.3] [1.6][1.7] [1.8][1.9] [1.10]	[1.2][1.3] [1.6][1.7] [1.8][1.9] [1.10]	[1.2][1.3] [1.6][1.7] [1.8][1.9] [1.10]	[1.2][1.3] [1.6][1.7] [1.8][1.9] [1.10]	[1.2][1.3] [1.6][1.7] [1.8][1.9] [1.10]	[1.2][1.3] [1.6][1.7] [1.8][1.9] [1.10]	[1.2][1.3] [1.6][1.7] [1.8][1.9] [1.10]	[1.2][1.3] [1.6][1.7] [1.8][1.9] [1.10]	[1.2][1.3] [1.6][1.7] [1.8][1.9] [1.10]	[1.2][1.3] [1.6][1.7] [1.8][1.9] [1.10]	[1.2][1.3] [1.6][1.7] [1.8][1.9] [1.10]	[1.2][1.3] [1.6][1.7] [1.8][1.9] [1.10]	[2.1] [2.2] [2.3]	[2.1] [2.2] [2.3]	[2.2] [2.3] [2.4]	[1.1] [1.2] [1.3]	[1.4] [1.5] [1.6]	[1.7] [1.8] [1.9]	[1.11] [1.12] [1.13]
Baja a media 1.000 a 100.000	[1.2][1.3] [1.6][1.7] [1.8][1.9] [1.10]	[1.2][1.3] [1.6][1.7] [1.8][1.9] [1.10]	[1.2][1.3] [1.6][1.7] [1.8][1.9] [1.10]	[1.2][1.3] [1.6][1.7] [1.8][1.9] [1.10]	[1.2][1.3] [1.6][1.7] [1.8][1.9] [1.10]	[1.2][1.3] [1.6][1.7] [1.8][1.9] [1.10]	[1.2][1.3] [1.6][1.7] [1.8][1.9] [1.10]	[1.2][1.3] [1.6][1.7] [1.8][1.9] [1.10]	[1.2][1.3] [1.6][1.7] [1.8][1.9] [1.10]	[1.2][1.3] [1.6][1.7] [1.8][1.9] [1.10]	[1.2][1.3] [1.6][1.7] [1.8][1.9] [1.10]	[1.2][1.3] [1.6][1.7] [1.8][1.9] [1.10]	[2.1] [2.2] [2.3]	[2.1] [2.2] [2.3]	[2.2] [2.3] [2.4]	[1.1] [1.2] [1.3]	[1.4] [1.5] [1.6]	[1.7] [1.8] [1.9]	[1.11] [1.12] [1.13]
Media a alta 10.000 a 100.000	[1.2][1.3] [1.6][1.7] [1.8][1.9] [1.10]	[1.2][1.3] [1.6][1.7] [1.8][1.9] [1.10]	[1.2][1.3] [1.6][1.7] [1.8][1.9] [1.10]	[1.2][1.3] [1.6][1.7] [1.8][1.9] [1.10]	[1.2][1.3] [1.6][1.7] [1.8][1.9] [1.10]	[1.2][1.3] [1.6][1.7] [1.8][1.9] [1.10]	[1.2][1.3] [1.6][1.7] [1.8][1.9] [1.10]	[1.2][1.3] [1.6][1.7] [1.8][1.9] [1.10]	[1.2][1.3] [1.6][1.7] [1.8][1.9] [1.10]	[1.2][1.3] [1.6][1.7] [1.8][1.9] [1.10]	[1.2][1.3] [1.6][1.7] [1.8][1.9] [1.10]	[1.2][1.3] [1.6][1.7] [1.8][1.9] [1.10]	[2.1] [2.2] [2.3]	[2.1] [2.2] [2.3]	[2.2] [2.3] [2.4]	[1.1] [1.2] [1.3]	[1.4] [1.5] [1.6]	[1.7] [1.8] [1.9]	[1.11] [1.12] [1.13]
Alta 100.000 -	[1.2][1.3] [1.6][1.7] [1.8][1.9] [1.10]	[1.2][1.3] [1.6][1.7] [1.8][1.9] [1.10]	[1.2][1.3] [1.6][1.7] [1.8][1.9] [1.10]	[1.2][1.3] [1.6][1.7] [1.8][1.9] [1.10]	[1.2][1.3] [1.6][1.7] [1.8][1.9] [1.10]	[1.2][1.3] [1.6][1.7] [1.8][1.9] [1.10]	[1.2][1.3] [1.6][1.7] [1.8][1.9] [1.10]	[1.2][1.3] [1.6][1.7] [1.8][1.9] [1.10]	[1.2][1.3] [1.6][1.7] [1.8][1.9] [1.10]	[1.2][1.3] [1.6][1.7] [1.8][1.9] [1.10]	[1.2][1.3] [1.6][1.7] [1.8][1.9] [1.10]	[1.2][1.3] [1.6][1.7] [1.8][1.9] [1.10]	[2.1] [2.2] [2.3]	[2.1] [2.2] [2.3]	[2.2] [2.3] [2.4]	[1.1] [1.2] [1.3]	[1.4] [1.5] [1.6]	[1.7] [1.8] [1.9]	[1.11] [1.12] [1.13]
YODAS	[1.1]	[1.1]	[1.1]	[1.1]	[1.1]	[1.1]	[1.1]	[1.1]	[1.1]	[1.1]	[1.1]	[1.1]	[1.1]	[1.1]	[1.1]	[1.1]	[1.1]	[1.1]	[1.1]

CLAVE PARA LA SELECCIÓN DE VISTA DEL PROCESO DE FABRICACIÓN DE LA MATRIZ	
PROCESO DE FUNDICIÓN	PROCESOS DE MECANIZADO
1.1 ARENA DE FUNDICIÓN	[4.1] MECANIZADO AUTOMÁTICO
1.2 MOLDEO POR INYECCIÓN	[4.2] MECANIZADO MANUAL
1.3 FUNDICIÓN POR GRAVEDAD	[4.3] MECANIZADO POR DISCARGA ELÉCTRICA (E.C.M.)
1.4 FUNDICIÓN A PRESIÓN	[4.4] MECANIZADO POR HAZ DE ELECTRONES (E.E.M.)
1.5 FUNDICIÓN CENTRÍFUGA	[4.5] MECANIZADO POR HAZ DE LASER (L.B.M.)
1.6 FUNDICIÓN DE INVERSIÓN	[4.6] MECANIZADO ULTRASONICO (U.S.M.)
1.7 FUNDICIÓN POR CERÁMICA DE MOLDE	[4.7] MECANIZADO POR CHORRO ABRASIVO (A.A.M.)
1.8 FUNDICIÓN MOLDE DE YESO	[4.8] MECANIZADO POR CHORRO ABRASIVO (A.A.M.)
1.9 COMPRESIÓN DE FUNDICIÓN	[4.9] MECANIZADO POR CHORRO ABRASIVO (A.A.M.)
	[4.10] MECANIZADO POR CHORRO ABRASIVO (A.A.M.)
	[4.11] MECANIZADO POR CHORRO ABRASIVO (A.A.M.)
	[4.12] MECANIZADO POR CHORRO ABRASIVO (A.A.M.)

Tabla 3.1: Matriz de selección de procesos de fabricación PRIMA.

3.4. Metodología de Selección de Ashby.

La selección de procesos de manufactura expuesta por Michael F. Ashby [Ashby 2005], expresa que a fin de alcanzar una correcta selección como resultado del gran número de procesos existentes, debe existir una relación directa entre materiales, procesos, forma, y función que el producto desarrollará. Una decisión imprecisa será la causa de consecuencias que se verán reflejadas en los costes.

Dentro de esta metodología cada proceso es caracterizado por atributos tales como: materiales que el proceso puede manejar, formas que puede hacer, precisión, complejidad, tamaño, número de piezas que puede fabricar y aspectos económicos. La Figura 3.2 muestra el esquema de la metodología de Ashby para la selección de procesos.

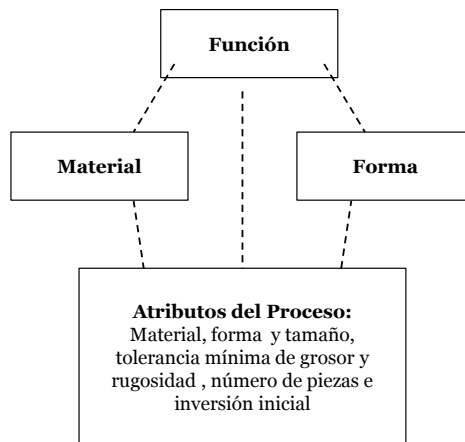


Figura 3.2: Esquema de la metodología de Ashby para la selección de procesos.

A fin de seleccionar un proceso, Ashby recomienda el uso de las características físicas del material, y los requerimientos de cada proceso, mediante el uso de matrices, diagramas o tablas desarrolladas para ese fin, agrupando los diferentes valores y datos de los procesos en familias según sus características. Las familias pueden ser referentes a la forma, la unión, o el acabado. La clasificación de un proceso se encuentra dividida en procesos primarios y secundarios, los primarios son los procesos que crean formas y los secundarios los que modifican las formas o las propiedades.

3.4. Metodología de Selección de Ashby.

La Figura 3.3 muestra cómo la selección del proceso es un procedimiento iterativo, donde la primera iteración da una o varias rutas de procesos posibles, los cuales se analizan para después modificar o replantear el diseño y adaptarlo a la ruta más prometedora.

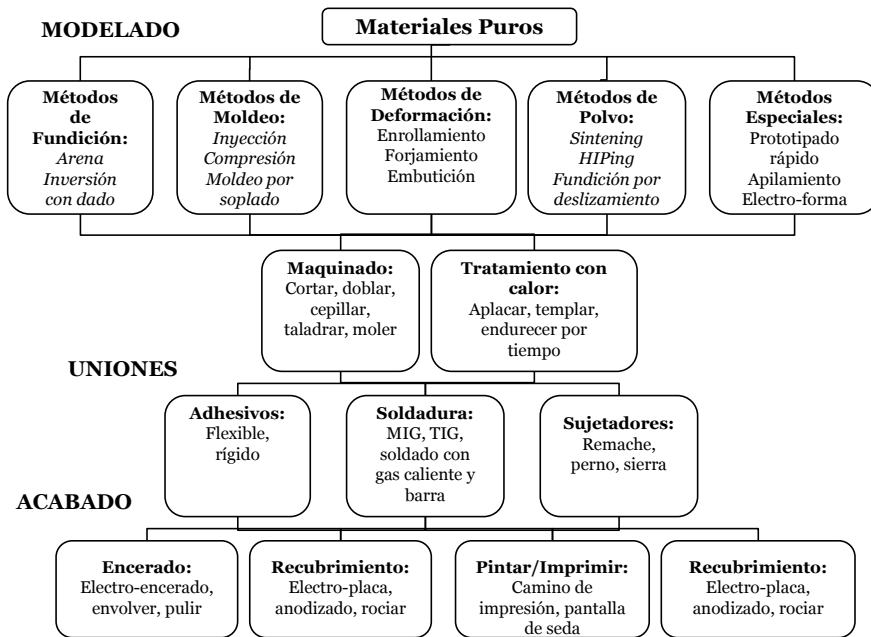


Figura 3.3: Diferentes Familias de procesos y sus derivaciones.

Otra forma de representar el universo de procesos disponibles e identificar la opción correcta es separando los procesos en: clases, subclases y atributos como se muestra en la Figura 3.4 donde a partir de la generalidad de procesos, se observan las diferentes familias que se subdividen en clases y subclases cada cual con sus correspondientes atributos.

La estrategia para la selección de procesos es que todos los procesos son considerados posibles candidatos hasta que no se demuestre lo contrario. Para realizar la selección, se consideran los requerimientos de diseño, y las restricciones que serán utilizadas para la eliminación de la totalidad de los candidatos, por medio de una preselección y eliminación de aquellos procesos que son incapaces de cumplir con los requerimientos dados. Una vez hecho esto, se clasifica el resultado mediante algún objetivo utilizando diagramas o matrices donde

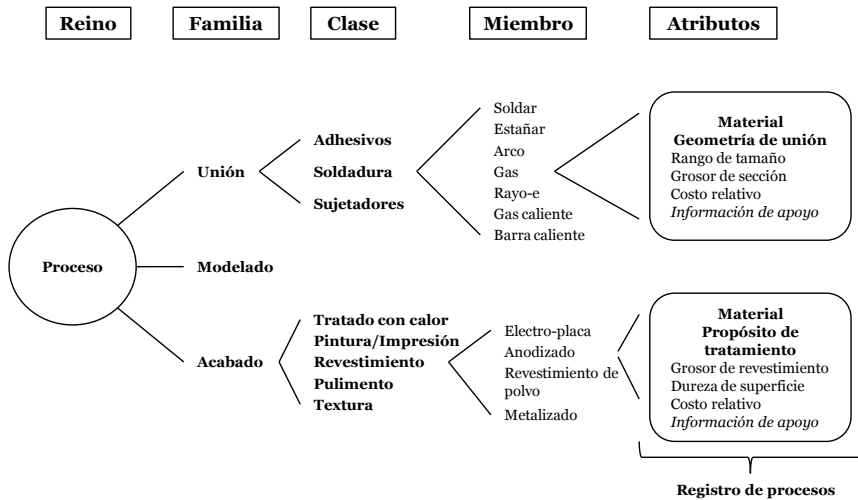


Figura 3.4: Expansión del Universo de procesos. Ejemplo de proceso de Unión.

se muestren los resultados más específicos de selección, ya sea por número de piezas, o costes, y, ordenando los resultados para que por medio de información adicional, como bases de datos o datos históricos se pueda complementar el análisis y obtener un proceso final seleccionado (Figura 3.5).

3.4.1. Diagramas de Selección

Para definir finalmente el proceso a utilizar, es necesario hacer uso de las matrices y diagramas propuestos por Ashby, donde cada proceso se caracteriza por una serie de parámetros que representan las características físicas de los materiales los cuales han sido ordenados convenientemente y donde se puede identificar gráficamente cuáles son sus propiedades para de esta forma elegir aquel que sea más apropiado al producto que se investiga [Kutz 2002]. Algunas de las matrices utilizadas son:

Matriz de proceso-materiales: donde para un determinado proceso pueda o no formar, unir, o dar acabado a algún material.

Matriz de proceso-forma: Han sido clasificadas por simetría, por procesos para chapa y para formas en tres dimensiones. Si el proceso no puede elaborar la forma deseada es necesario tener una operación secundaria para añadir las formas adicionales, pero, cabe recordar que esto aumentará el coste final (Figura 3.6).

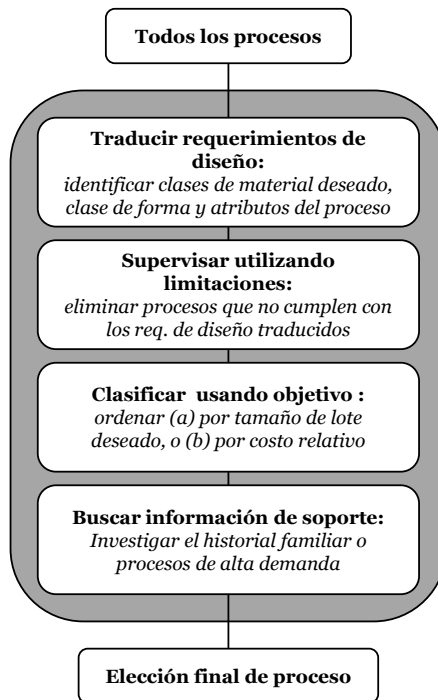


Figura 3.5: Diagrama de flujo de selección de material y proceso.

Diagrama de masas: Muestra el rango de masas de componentes que los procesos pueden hacer, agrupando los procesos por las clases de materiales, permitiendo así la discriminación de ambos: materiales y forma.

Diagrama de espesor: Muestra los límites de espesores que pueden ser trabajados por un proceso propuesto (Figura 3.7).

Diagramas de tolerancias y rugosidad: Ningún proceso puede formar una parte exactamente a una dimensión específica, alguna desviación es permitida, para tolerancias o por la amplitud de las irregularidades superficiales para la rugosidad, lo cual es mostrado en este diagrama.

Informes de procesos de selección: dependiendo de los requerimientos del diseño, proveen información general sobre capacidades y limitaciones de varias clases de procesos.

		Prismático circular	Prismático no circular	Lámina plana	Lámina en plato	Sólida 3-D	Hueca 3-D
Modelado de Metales	Procesos con arena	•	•			•	•
	Procesos de inyección	•	•			•	•
	Procesos con cera	•	•			•	•
	Procesos de baja presión	•	•			•	•
	Forjado	•	•			•	
	Extrusión	•	•				
	Formación de Láminas	•	•	•	•		
	Método de Polvo	•	•			•	•
	Electro-maquinado	•	•	•	•	•	•
	Maquinado convencional	•	•	•		•	•
Modelado de Cerámicos	Moldeo por inyección					•	•
	Moldeo por soplado				•		•
	Moldeo por compresión			•	•	•	
	Moldeo rotacional				•		•
	Formación Térmica	•	•		•		
	Fundición de polímeros	•	•			•	•
	Moldeo de transferencia de resina	•	•	•	•	•	•
	Devanado de filamentos				•		•
	Métodos de lay-up			•	•	•	
	Bolsa de Vacío			•	•		
Modelado de Polímeros							
Modelado de Compósitos							

Figura 3.6: Matriz Proceso-Forma. La información sobre la compatibilidad de los materiales se incluye en el extremo izquierdo.

3.4.2. Revisión de Metodología Ashby

Esta metodología permite al diseñador identificar los procesos, adecuados de selección para un diseño dado, por medio de esquemas de familias, diagramas y datos técnicos que se utilizan de manera progresiva para identificar la mejor solución. Sin embargo, es necesario el conocimiento previo en aspectos técnicos por parte del diseñador para un completo dominio de la metodología. Comprender, analizar y elegir criterios de diseño por medio de bases de datos y gráficos requiere de previa experiencia y una cantidad considerable de tiempo de planeación.

Utilizar esta metodología permite identificar rápidamente los procesos que pueden ser útiles, y que cumplan con las exigencias de diseño.

Por otra parte, esta metodología de selección no da la oportunidad a cualquier usuario de hacer uso de ella, ya que es necesario el conocimiento por parte del experto de manera presencial.

3.5. Selección General de Procesos de Producción de Halevi

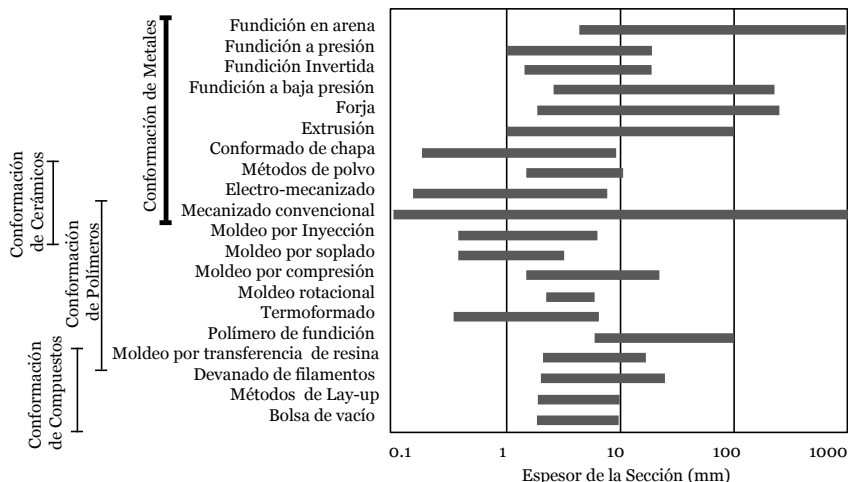


Figura 3.7: Diagrama de espesor de Ashby.

3.5. Selección General de Procesos de Producción de Halevi

La metodología de selección de Halevi [Halevi 2003] explica que una pieza es diseñada en base a una serie de parámetros y limitantes que son previamente estipulados por un diseñador. Éste usualmente se basa en la intuición para la toma de decisión del proceso de fabricación que tiene en mente en el momento del diseño, esto afecta significativamente en el proceso, es decir, las partes que fueron diseñadas para un proceso de fabricación específico, podrían resultar muy difíciles de fabricar si el proceso tiene que ser cambiado.

El diseñador debe tener en cuenta el proceso de manufactura con que se producirá cada parte que diseña. Cada uno de los procesos tiene sus propias características, de otra manera, no se controlarían factores de producción o costes. Los diseñadores no definen un plan, por lo regular dirigen sus diseños hacia la utilización de procesos comunes, preferiblemente hacia aquellos que están disponibles en su propio entorno de trabajo. Por esta razón Halevi propone hacer uso de la Ingeniería Concurrente.

La Ingeniería Concurrente propone que la decisión del proceso debería ser tomada mutuamente, después de un análisis hecho por aquellos involucrados o afectados por la decisión. Una acertada decisión es aquella que encuentra un

balance entre los costes de material, fabricación y ensamble.

Existe una relación directa entre los siguientes parámetros para la elección de un proceso:

- Cantidad
- Forma
- Material
- Tamaño
- Espesor
- Tolerancias
- Coste
- Operaciones Secundarias

Halevi recomienda que la selección de un proceso inicialmente, deba ser hecha teniendo en cuenta los factores económicos, además de los tiempos de manufactura los cuales pueden llegar a ser considerables. Otro factor importante será la cantidad requerida de piezas, fundamental para determinar el proceso a elegir.

3.5.1. Parámetros de Selección de Procesos de Manufactura

Cuando se desea seleccionar un proceso, se consideran parámetros como velocidades, fuerza, tamaño de la máquina, torque, tolerancias permisibles, velocidades, cantidad de piezas, etc. Un método común es considerar el tamaño de la pieza de trabajo y su exactitud y con ello estimar los parámetros requeridos [Halevi 1995] .

Desafortunadamente elegir una máquina en base a este método puede dar como resultado una elección inexacta ya que no se conocen con anterioridad los límites y las especificaciones de la máquina.

La selección debe realizarse considerando también la complejidad de forma y la cantidad de piezas a fabricar. Dividiendo la complejidad en cuatro partes que son mono, abierto, complejo y muy complejo, las cuales difieren una de otra

por las características de forma de la pieza y de las perforaciones que presentan. Para seleccionar una máquina, se recomienda que las actividades del proceso sean separadas en dos fases:

- La primera fase maneja la etapa de ingeniería y sus límites tomando en cuenta sólo consideraciones tecnológicas. Para cada operación se definen los parámetros que garantizan que la parte será construida de acuerdo a las especificaciones definidas en el diseño. Sin embargo no considera la disponibilidad de la maquinaria en los talleres de fabricación.
- La segunda fase es transformar las operaciones teóricas en prácticas, es decir ajustar las características del diseño a las opciones disponibles de los procesos. Esto se logra mediante un análisis combinatorio donde se generen y computen todas las alternativas para correlacionarlas con las opciones disponibles, mediante un análisis matemático.

3.5.2. Preselección de Procesos

Una preselección de las alternativas posibles se realiza dividiendo el análisis en tres pasos: el primero de ellos se basa en el tipo de máquina y sus dimensiones, en este primer paso sólo aquellas máquinas que absolutamente no puedan cumplir con las operaciones serán excluidas. Esta parte del análisis está basada en los conocimientos previos de los procesos por parte del equipo que sea responsable de la planeación.

En la segunda parte, se realiza una comparativa de la capacidad de potencia de la máquina para la operación dada. Una máquina debe estar en un rango muy cercano de potencia al trabajo que realizará, si la potencia es mayor o menor que la necesaria para realizar la operación, determinará que los procesos sean excluidos de la selección.

Por último, el tercer paso sólo es empleado si el número de las opciones restantes es alto. Se estima la utilización de una máquina dada comparando su tiempo y coste con otras máquinas. De las opciones que se tienen, se procede con los siguientes criterios:

- Seleccionar las tres máquinas que tengan el menor tiempo de maquinado.
- Seleccionar máquinas que obtengan la pieza a un coste muy bajo.
- Si aún se tienen muchas opciones, seleccionar aquellas de menor coste de operación con mayor número de operaciones.

3.5.3. Matrices de Solución

La matriz de solución deberá especificar la selección de la máquina y la secuencia de operaciones. La solución es el resultado de generar todas las alternativas y escoger la mejor. Las operaciones teóricas son el absoluto óptimo que probablemente no pueda ser alcanzado, pero puede ser usado como criterio. Este valor puede ser usado para determinar si existe una sola máquina que proporcione un proceso óptimo y por tanto, si hay algún sentido en la generación y evaluación de otras alternativas. Si tal máquina no existe la matriz general es utilizada. La matriz de una sola máquina, se utiliza al asumir que tenemos una máquina ideal con las propiedades más deseadas que cualquier otra presente en la matriz.

La matriz general está basada matemáticamente en una técnica de programación dinámica. La característica de ello es que el óptimo puede ser alcanzado gradualmente pasando de una etapa a la siguiente. Un cierto juego de soluciones óptimas se obtiene en la primera etapa, entonces son integradas a la segunda etapa para obtener un número de respuestas dadas ciertas condiciones, repitiendo el ciclo hasta encontrar la solución óptima en la última etapa.

3.6. Proceso de Selección de Manufactura de Dieter

La metodología de selección de G. Dieter recomienda que un material debe ir íntimamente asociado al proceso con el cual será fabricada la pieza. El objetivo principal de seleccionar el material y el proceso de manera conjunta es maximizar la calidad y minimizar los costes de fabricación de la pieza. En la Tabla 3.2 se muestra la relación existente entre los materiales y los procesos capaces de utilizarlos [Dieter 1997]. Para llevar a cabo esta selección, es necesario tomar en cuenta los siguientes elementos:

Tipo de Material. Es quién define de acuerdo a sus características, los tipos de procesos que pueden utilizarse.

Forma. Cada proceso va asociado con los tipos de materiales con los que puede trabajar. Esta es la primera decisión a tomar. Los factores que contribuyen a la complejidad de la forma son: El espesor mínimo que puede trabajar, la presencia de muescas y ángulos entrantes, y por último la presencia de cavidades complejas.

Factores del proceso. Los factores clave que incluye un proceso son tiempo, calidad, flexibilidad, utilización de materiales y costes de operación.

Tamaño y forma de la pieza. Expresada en volumen, área o peso. Donde el máximo tamaño dependerá de las características del equipo. Para la forma se debe seleccionar un proceso primario que pueda finalizar la pieza sin requerir de procesos secundarios que aumenten el coste.

Complejidad de la pieza. A partir de la forma, la complejidad es un factor consecuente que puede ser medible con la información contenida en la pieza y que está relacionada con la falta de simetría, es decir, midiendo el número de dimensiones independientes que describen la pieza.

Tolerancias. Las tolerancias geométricas o desviación permitida en las dimensiones así como la superficie de acabado que se desea dependen de la capacidad de cada proceso.

Por otra parte se tienen las características físicas del diseño de la pieza como: especificaciones, el número requerido de partes, tamaño, forma, espesor, acabado, y tolerancias. Todo lo anterior, constituye un conjunto de restricciones en la selección de un proceso. Con la información anterior se debe decidir cuál es el objetivo del proceso. Generalmente el coste de la pieza a fabricar será la principal línea a seguir, sin embargo también podría maximizar la calidad de la parte o minimizar el tiempo de elaboración. Utilizando las restricciones identificadas, se verifican los procesos de manufactura y se procede a eliminar a aquellos que no puedan cumplir con las especificaciones (Figura 3.8). Una vez reducida la lista de posibles procesos, estos deberán ser organizados de acuerdo al coste de manufactura.

Existen muchos procesos que pueden cumplir con el diseño, aunque cada cual tiene sus propias capacidades y limitantes. Es importante tomar en cuenta cualquier requerimiento como especificar la más amplia tolerancia que la pieza soporta, así como el más áspero acabado superficial que satisfaga los requerimientos funcionales. Recordar que el menor cambio en la forma, espesor o radio, puede provocar la fabricación de la pieza por otros procesos incluso más económicos [Schey 2000].

Tabla 3.2: Compatibilidad entre materiales y procesos de manufactura.

Proceso	Hierro Fundido	Acero de carbono	Alcación de acero	Acero inoxidable	Aluminio y aleaciones de aluminio	Cobre y aleaciones de cobre	Zinc y aleaciones de zinc	Magnesio y aleaciones de magnesio	Titanio y aleaciones de titanio	Níquel y aleaciones de níquel	Metales Refractarios	Termoplásticos	Plástico Termoes estable
Fundido/Moldeo													
Fundición en arena	•	•	•	•	•	•	—	•	—	•	—	X	X
Moldeo por inversión	—	X	•	X	•	•	—	—	—	•	—	X	X
Fundición	X	X	X	X	X	—	•	•	X	X	X	X	X
Moldeo por inyección	X	X	X	X	X	—	•	•	X	X	X	X	X
Moldeo de espuma estructural	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	•	—
Moldeo por soplado (Extrusión)	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	•	X
Moldeo por soplado (Inyección)	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	•	X
Moldeo rotacional	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	•	X
Forjado/formación volumétrica													
Extrusión por impacto	X	•	•	•	•	•	•	—	X	X	X	X	X
Extrusión en frío	X	•	•	•	•	•	•	—	X	X	X	X	X
Forjado cerrado	X	•	•	•	•	•	•	—	•	—	—	X	X
Prensado y sinterizado	X	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	X	X
Extrusión caliente	X	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	X	X
Extrusión rotacional	X	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	X	X
Masquinado													
Masquinado en serie	•	•	•	•	•	•	•	•	—	—	—	—	—
Moldeo por electroquímico	•	•	•	•	—	—	—	—	•	•	—	X	X
Masquinado por descarga eléctrica (EDM)	X	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	X	X
EBM calentado	X	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	X	X
Moldeado													
Moldeado de láminas	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Termoformado	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Hilado de metal	X	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•

•, práctica normal; —, práctica menos común; X, no aplicable.

3.7. Métodos de Evaluación Multi Criterio.

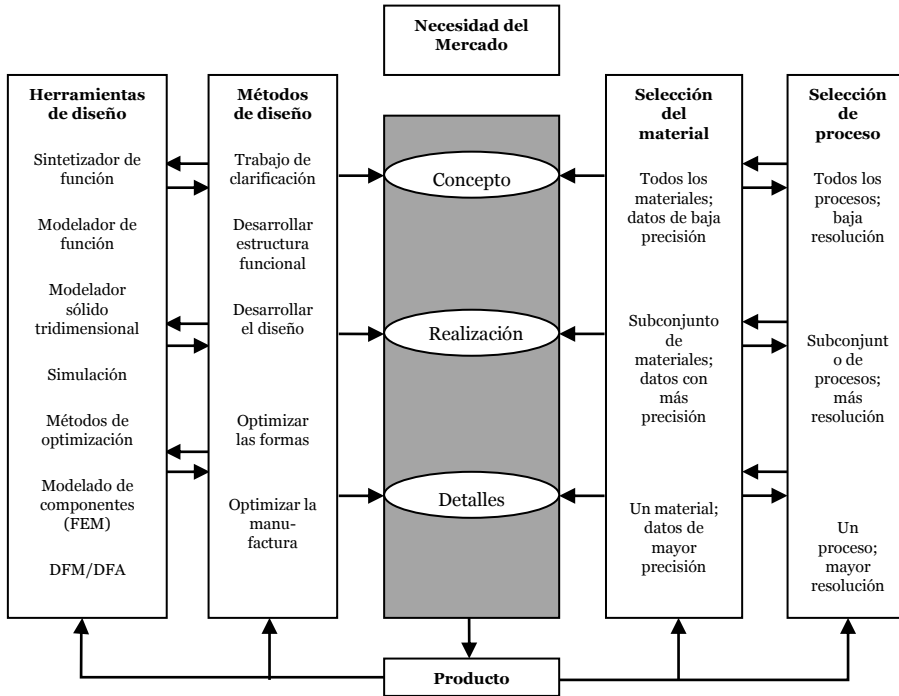


Figura 3.8: Esquema del Proceso de Diseño utilizado por Dieter.

3.7. Métodos de Evaluación Multi Criterio.

Estos métodos comprenden la selección entre un conjunto de alternativas factibles, la optimización con varias funciones objetivo simultáneas y un agente decisor y procedimientos de evaluación racionales y consistentes. Son especialmente utilizados para tomar decisiones frente a problemas que cobijan aspectos intangibles a evaluar.

Sus principios se derivan de la Teoría de Matrices, Teoría de Grafos, Teoría de las Organizaciones, Teoría de la Medida, Teoría de las Decisiones Colectivas, Investigación de Operaciones y de Economía [Martí 1998].

3.7.1. Topsis

Existen diversas técnicas de solución multicriterio para diferentes problemas de selección. TOPSIS es una de ellas, la cual ha sido aplicada a la selección de equipos de manufactura [Athán 2008]. Llamada así por su nombre en Inglés *Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution*, Técnica para Preferencia de Orden por Semejanza para Solución Ideal. TOPSIS es [Olson 2004] definido como un método multicriterio para identificar soluciones, desde un conjunto limitado de alternativas basado en la minimización simultánea a partir de un punto ideal y la maximización de la distancia. Desde el punto más bajo, TOPSIS puede incorporar pesos relativos para diversos criterios de importancia [Shiha 2007, Wanga 2007]. Introducido en 1981 por Hwang y Yoon [Hwang 1981] este sistema es atractivo ya que sólo se requieren entradas subjetivas como los pesos asignados a los atributos que se desean evaluar. TOPSIS ha sido utilizado en finanzas, manufactura flexible, selección de procesos [Chau 1995], en robótica, también se ha trabajado en conjunto utilizando redes neuronales y lógica difusa.

La estructura funcional de TOPSIS puede ser expresada por:

- La obtención de n números de datos para k números de atributos los cuales están en forma estandarizada.
- Desarrollar un conjunto de pesos para cada uno de los criterios.
- Identificar la alternativa ideal.
- Identificar la alternativa más baja.
- Desarrollar una medida de distancia en cada criterio a ambos ideales.
- A cada alternativa, determinar un radio R igual a la distancia del valor más bajo, dividido por la suma de la distancia del valor más bajo y el valor ideal.
- Ordenar los radios R de cada alternativa de acuerdo al R máximo.

Una ventaja del uso de este método es que puede encontrar una solución de manera rápida, en comparación a otros métodos multiatributos.

3.7.2. AHP

Es una herramienta empleada principalmente en el diseño conceptual, fue desarrollada en *Wharton School of Business* por Thomas Saaty [Saaty 1980].

AHP (*Analytic Hierarchy Process*), Proceso de Jerarquía Analítico, es un proceso de ayuda para la toma de decisiones que permite establecer prioridades con la finalidad de tomar la mejor decisión. Esta herramienta es ampliamente utilizada en la ingeniería para la evaluación y selección. La aplicación de esta técnica se basa en la experiencia y conocimientos de los expertos o usuarios para determinar los factores que afectan a la decisión del proceso [Hambali 2008].

AHP puede ser utilizada junto a otras técnicas como *Quality Function Deployment* QFD (Despliegue de Función de Calidad), y *Data Envelopment Analysis* DEA (Análisis Envoltante de Datos), especialmente para áreas relacionadas con la logística y la industria manufacturera [Ho 2008].

Consta de tres principios fundamentales, el primero consiste en la organización del marco por jerarquías, después el análisis de prioridad y por último la verificación de la consistencia. Formular la decisión de problema en el formato de jerarquías es el primer paso, con el nivel superior representando la meta. Los niveles intermedios representan los criterios y sub criterios y las alternativas de decisión en el nivel más bajo. Este sistema permite a los usuarios dar valores de ponderación que van del 1 al 9 para medir la contribución de cada elemento al elemento superior del cual se desprende.

En resumen la estructura de un modelo AHP puede ser representada por:

- La priorización de los elementos del modelo jerárquico.
- Comparación binaria entre los elementos.
- Evaluación de los elementos mediante asignación de pesos.
- Ranking de las alternativas de acuerdo con los pesos dados.
- Síntesis.
- Análisis de Sensibilidad

3.8. Calculadoras de Corte En Línea

Existen en el mercado sistemas de cálculo utilizando interfaces gráficas tipo calculadora, los cuales han sido creados por las compañías fabricantes de sistemas de corte, y que permiten de una manera breve calcular algunos parámetros

como velocidad o calidad dependiendo de la información inicial que se proporcione. Estos sistemas generalmente son fabricados para un sólo proceso y no permiten una valoración integral del proceso por los pocos datos requeridos.

3.8.1. Calculadora KMT

Esta calculadora ha sido desarrollada por KMT empresa fabricante de equipos de corte por agua. En este sistema se introducen algunos parámetros de la pieza y la máquina como material a cortar, espesor del material, presión de la bomba, orificio de la boquilla, diámetro del tubo y velocidad del abrasivo. La Figura 3.9 muestra la pantalla principal de esta calculadora.

Cutting Parameters	
Material:	Aluminum 6061-T6
Thickness:	0.50 in.
Water Pressure:	50,000 psi
Orifice Size:	0.010 in.
Focus Tube Dia:	0.030 in. *
Abrasive Rate:	0.7 lb/minute *

Cutting Speed Prediction	
Edge Quality	Linear Cut Speed
1) Separation Cut	25.96 ipm
2) Rough	11.70 ipm
3) Medium	7.34 ipm
4) Smooth	5.27 ipm
5) Very Smooth	4.08 ipm

Speed based on Autoline™ cutting head w/80 grit garnet
 * Default values deliver the optimal cutting performance
 See the Help file for additional information.

Figura 3.9: Calculadora KMT.

El sistema da como resultado una velocidad de corte en pulgadas por minuto, dependiendo de los valores proporcionados. Este tipo de calculadora permite conocer la calidad del corte resultante para diferentes valores sugeridos de velocidad, sin embargo, alimentar al sistema con datos más precisos que el material y espesor, indica que el sistema está pensado para usuarios que conocen el proceso de corte por agua, y que el mismo usuario puede, por medio de la experiencia, predecir cómo será el acabado y la velocidad de corte de acuerdo a los valores iniciales.

3.8.2. Calculadora de Corte por Láser PRC

La calculadora de corte por láser de la empresa *PRC Láser Corp* permite al usuario elegir el material que se desea cortar, un espesor a elegir entre 1 y 40 mm y una fuente de potencia para el láser de entre 1000 y 6000 vatios como se muestra en la Figura 3.10.

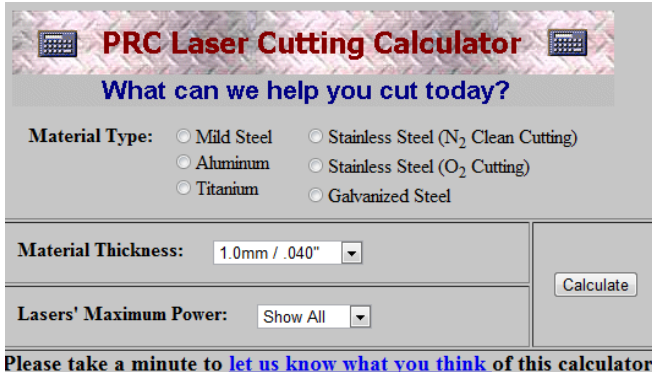


Figura 3.10: PRC Calculadora Láser.

El resultado mostrado es una tabla como la mostrada en la Figura (3.11) la cual indica el tipo de láser recomendado, potencia requerida, el tiempo de perforación y el gas de aporte sugerido.

Pierce Type	Laser Power	Step Hz	Step %	Step Time	# Steps	Pierce Time	Assist Gas
Fast	1500 Watts						
	- Gated Pulse, 250 Hz, 35% Duty Cycle					1 Seconds	0.8 Bar, (11.6 PSI) Oxygen
Peck	1000 Watts						
	- SuperPulse, 250 Hz, 30% Duty Cycle					4 Seconds	0.8 Bar, (11.6 PSI) Oxygen

Figura 3.11: Resultados sugeridos por la calculadora láser de PRC.

En este modelo de cálculo no existe una relación directa entre el tipo de material y el espesor solicitado, el sistema permite elegir entre cualquier espesor, aunque exceda el límite posible en el rango del láser, el sistema no muestra una

indicación que denuncie el error, o un rango de posibles elecciones permitidas.

3.8.3. Calculadora para Corte por Láser SYNRAD

Elaborada para proporcionar valores aproximados para laser de CO_2 , el fabricante SYNRAD (Figura 3.12). Permite conocer la velocidad de corte a partir del tipo de material, espesor y la potencia de la fuente láser.

Este sistema de cálculo, tiene la característica que indica si el rango de espesor o de potencia está excedido de lo permitido para la capacidad de la máquina, tras lo cual muestra una indicación de que se debe reconsiderar el valor propuesto.

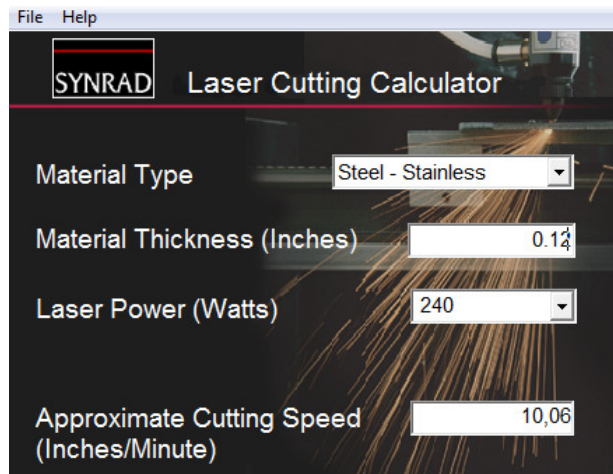


Figura 3.12: Calculadora de corte para Láser SYNRAD.

3.8.4. Revisión de Calculadoras En Línea

El uso de este tipo de calculadoras de corte, permite conocer el comportamiento general de un proceso específico. No existe ningún sistema de este tipo que permita elaborar una comparación entre diferentes procesos de corte. Los datos de entrada y de salida difieren en la mayoría de los casos, siendo similares sólo en el tipo de material y el espesor. Lo ideal sería un sistema que proporcione como resultado una propuesta de corte ideal, dependiendo de

las características iniciales de la pieza, y que esta propuesta sea basada en un análisis a partir de los mismos valores e información para todo el universo de procesos ofrecido.

3.9. Líneas de Investigación en la Selección de Procesos No Convencionales

El grado de dificultad para la fabricación de una pieza se incrementa por razones económicas, por las propiedades físicas de los materiales como por ejemplo la dureza, por la complejidad de la pieza, la superficie de acabado, las tolerancias requeridas, el incremento de temperatura, la tensión en la pieza, etc. [Venka 2007]. Tomando en cuenta esto, Cogun et al. [Cogun 2007] desarrollaron un método que identifica una alternativa para el usuario con una lista de procesos apropiados para piezas con relativamente pocos requerimientos de diseño. Con el fin de eliminar los procesos que no son buenos candidatos, desarrollaron un procedimiento de selección multi atributos utilizando TOPSIS (3.7.1) y la técnica AHP (3.7.2). AHP fue utilizado para asignar pesos a los diferentes atributos de los procesos, mientras que TOPSIS fue utilizado para elaborar un listado final para cada una de las alternativas de los procesos no convencionales.

Chakraborty [Chakr 2007] por su parte, sugiere un sistema experto basado en un QFD para procesos no convencionales. El desarrollo de este sistema emplea el uso de una casa de matriz de calidad (Figura 3.13) para la comparación de características relevantes del producto y del proceso. Los pesos obtenidos por las características de varios procesos fueron utilizados para estimar una puntuación global para cada uno de los procesos no convencionales tomando como elección aquel que posea la mayor puntuación. Este procedimiento requiere de cierto nivel de conocimiento por lo que puede ir más allá de la capacidad de un usuario no experto.

3.10. Externalización del Proceso de Selección

Existen diversos centros de investigación tecnológica, los cuales de manera conjunta con las empresas desarrollan metodologías que permiten seleccionar y optimizar los procesos consiguiendo así un incremento de beneficios para la industria y a su vez proporcionándole ventajas tecnológicas competitivas. Los centros de Investigación y Desarrollo (I+D) proporcionan una gran oferta en la colaboración de productos y servicios en tecnologías de maquinado y nuevas tecnologías de fabricación.

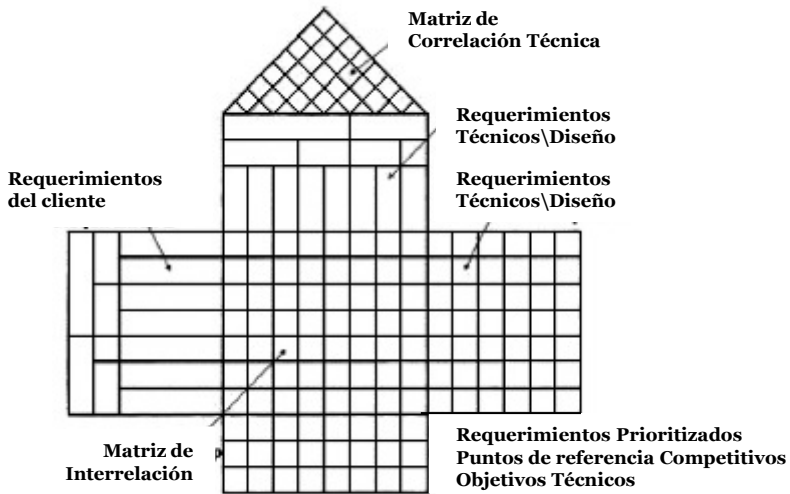


Figura 3.13: Matriz de Calidad QFD para procesos no convencionales.

El ámbito de la máquina herramienta y de las tecnologías de la fabricación están evolucionando para dar respuesta a mercados y sectores cada vez más exigentes en parámetros de productividad, fiabilidad y precisión con productos de alto valor añadido, es por ello que estos centros ofrecen una labor de apoyo tanto a fabricantes de máquinas como a usuarios de las mismas en el desarrollo tecnológico bien de las máquinas o bien de componentes aplicando nuevas soluciones tecnológicas como pueden ser nuevos procesos de mecanizado, nuevos materiales, nuevas herramientas, etc. Es por ello que apostar por este tipo de centros, es tecnológicamente más viable que fabricar una pieza con una máquina herramienta generalista.

La metodología propuesta por este tipo de centros en esencia es la misma para las distintas fases posibles de aplicación, (oferta, diseño, puesta a punto), con ligeras variantes en cada caso. El esquema siguiente refleja los pasos a seguir en un caso genérico [Zelai 2006].

La metodología proporciona ventajas en diferentes fases del desarrollo de producto.

- **En la fase de oferta.** Permite disponer de una oferta tanto a nivel de equipamiento (máquina seleccionada, utillaje básico) como de condiciones

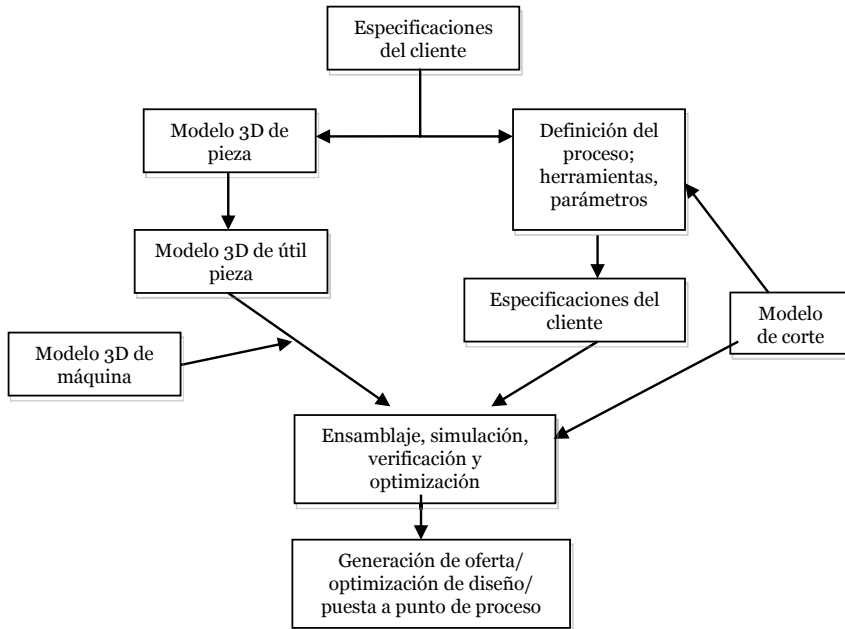


Figura 3.14: Metodología propuesta para un centro I+D.

de proceso, y con ello tiempos y coste de mecanizado, mucho más ajustado y verificado, evitando posibles problemas posteriores.

- **En la fase de desarrollo del proyecto.** Afina al máximo la máquina y utillajes, así como la selección de herramientas y condiciones de proceso.
- **En la fase de puesta a punto.** Disminuye el número de pruebas a realizar, y depura los programas de mecanizado antes de introducirlos en la máquina. De esta manera, los ensayos a realizar para verificar la validez de la solución propuesta se minimicen.
- Otra ventaja competitiva es la reducción de costes que se consigue al disminuir el número de ensayos, apoyarse en programas expertos, y seguir una metodología previamente establecida.

3.10.1. Revisión de los Centros de Investigación

La selección de un proceso de manufactura por parte de un centro de investigación es un método seguro y fiable ya que proporciona al usuario la información

que previamente ha sido analizada y comprobada. Sin embargo, este tipo de análisis previo requiere de una inversión elevada que debe contemplarse. Este análisis muestra al cliente que se domina el proceso desde la fase de concepción hasta la consecución del mismo, controlándose todas las variables que toman parte en él. Se verifica todo el proceso en la fase de diseño y previamente a fabricar cualquier elemento, disminuyendo el riesgo de errores.

3.11. Conclusiones del Capítulo

Se presentaron diversas metodologías para la selección de procesos de corte. El uso de estas metodologías es una alternativa viable que permite elegir de manera rápida y fácil un proceso o alternativas de procesos basándose en la cantidad de producción y en el material que se desea utilizar. Sin embargo debe tomarse en cuenta ciertas limitantes en el uso de matrices, esquemas de familias, diagramas y datos técnicos que se utilizan de manera progresiva para identificar la mejor solución.

La selección obtenida será una lista de procesos pero no existe una forma cuantitativa de comparación entre ellos, es decir, el usuario debe de elegir entre los procesos propuestos de acuerdo a la experiencia y conocimiento previos que posea.

Externalizar la selección de un proceso de manufactura por parte de un centro de investigación es un método seguro y fiable ya que proporciona al usuario la información que previamente ha sido analizada y comprobada. Sin embargo, este tipo de análisis previo requiere de una inversión elevada que debe contemplarse. Este análisis muestra al cliente que se domina el proceso desde la fase de concepción hasta la consecución del mismo, controlándose todas las variables que toman parte en él. Se verifica todo el proceso en la fase de diseño y previamente a fabricar cualquier elemento, disminuyendo el riesgo de errores.

El uso de calculadoras de corte permite conocer el comportamiento general de un proceso específico. Como se mencionó anteriormente, no existe una estandarización de los datos de entrada y de salida, ya que difieren en la mayoría de los casos, siendo similares sólo en el tipo de material y el espesor. Tampoco se permite elaborar una comparación entre diferentes procesos de corte. Lo ideal sería un sistema que proporcione como resultado una propuesta de corte ideal, dependiendo de las características iniciales de la pieza, y que esta propuesta sea basada en un análisis a partir de los mismos valores e información para todo el universo de procesos ofrecido.

3.11. Conclusiones del Capítulo

Los esfuerzos deben ampliarse para determinar los atributos que influyan en la selección de un proceso no convencional para una aplicación dada, utilizando un enfoque lógico, y que elimine los procesos no apropiados. Es necesaria una metodología que sea de fácil uso, aplicable a la selección de procesos de corte y que permita de manera sencilla y rápida, identificar el proceso o procesos de corte más adecuados a las necesidades de la pieza a fabricar. Una herramienta que permita incorporar el conocimiento de los expertos dentro de su proceso de selección.

Bibliografía

- Ahsby 2005** Ahsby F. “Materials Selection in Mechanical Design” Third Edition, chapter 7, pp.175-217, 2005.
- Athan 2008** Athanasopoulos G. “Coating Selection Methodology. A Strategy Over the Optimun Surface Treatment Selection for Maximizing Design Efficiency of Mechanical Parts” UPC, Chapter 5, pp.147-172, 2008.
- Booth 1994** Boothroyd G., Dewhurst P., and Knight W. “Product Design for Manufacture and Assembly” Marcel Dekker Inc. 1994.
- Chakr 2007** Chakraborty D. “ QFD-Based Expert System for Non Traditional Machining Processes Selection” Science Direct, Expert System with Applications 32, pp. 1208-1217, 2007.
- Chau 1995** Chau O., Parkan C. “Selection of a Manufacturing Process with Multiple Attributes: A Case Study” Journal of Engineering and Technology Management, Vol.12, pp. 219-237,1995.
- Cogun 2007** Cogun C., Yundakul M. “Development of a Multi-Attribute Selection Procedure for Non.Conventional Machining Process” Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, part 2, pp.115-124, 2007.
- Dargi 1982** Dargie P., Parmeshwar K., and Wilson R. “MAPS 1: Computer Aided Design System for Preliminary Material and Manufacturing Process Selection” ASME, Mechanical Design 104, pp.126-136, 1982.
- Dieter 1997** Dieter G. “Overview of the Material Selection Process” in ASM Handbook Materials Selection and Design” Vol.20 pp.549-761, 1997.
- Djass 2008** Djassemi M. “A Computer-Based Economic Analysis for Manufacturing Process Selection” Proceedings of The 2008 IAJC-IJME International Conference, 2008.
- Kutz 2002** Kutz M. “Handbook of Material Selection” Second Edition, chapter 1, pp. 3-27, 2002.
- Hamba 2008** Hambali A., Salit S. “Use of Analytical Hierarchy Process (AHP) for Selecting the Best Design Concept” Journal Of Technology 49, pp. 1-18, 2008.
- Halevi 2003** Halevi G. “Process and Operation Planning” Chapter 5, pp.85-104, 2003.

- Halevi 1995** Halevi G., Weill R. "Principles of Process Planning: A Logical Approach" First Edition, Chapter 5, pp.92-119, 1995.
- Ho 2008** Ho W. "Integrated Analytic Hierarchy Process and Its Applications- A Literature Review" European Journal of Operational Research vol.186 pp.211-228, 2008.
- Hwang 1981** Hwang C., Yoon K. "Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications" Lecture notes in Economical and Mathematical Systems, Springer-Verlag, 1981.
- KMT 2011** KMT "Calculadora de Coste" Disponible Electrónicamente, www.kmt-wj.com/process/calculator.htm, 2011.
- Manoc 2008** Manocher D. "A Computer-Based Economic Analysis for Manufacturing Process Selection," Proceedings of The 2008 IAJC-IJME International Conference, ISBN 978-1-60643-379-9, 2008.
- Martí 1998** Martínez E., Escudey M. "Evaluación y Decisión Multicriterio: Reflexiones y Experiencias" Primera Edición, Capítulo 1, pp.9-16, 1998.
- Olson 2004** Olson D. "Comparaison of Weights in TOPSIS Models" Mathematical and Computer Modelling 0, 1-0, Elsevier, 2004.
- PRC 2011** PRC "Laser Cutting Calculator" Disponible Electrónicamente, www.prclaser.com/calculator.html
- Saaty 1980** Saaty T. "The Analytic Hierarchy Process" Mc. Graw Hill, pp.75-105, 1980.
- Santos 2001** Santos S., Ferrante M. "Selection Methodologies of Materials and Manufacturing Process: Guidelines and Case Studies" Jornadas SAM-CONAMET-AAS, 2001.
- Schey 2000** Schey J. "Introduction to Manufacturing Processes" Third Edition, pp. 884-927, 2000.
- Shiha 2007** Shiha H. "An Extension of TOPSIS for Group Decision Making" Mathematical and Computer Modelling 45, pp.801-813, 2007,
- SYNRA 2011** SYNRA Laser System Innovations "Laser Processing Calculator" Disponible Electrónicamente, www.synrad.com/Applications/LaserProcessCalculator.html, 2011.
- Swift 2003** Swift K. and Booker J. "Process selection: from design to manufacture" Elsevier Second Edition, pp.20-34, 2003.

- Venka 2007** Venkata R. “Decision Making in the Manufacturing Environment” Springer-Verlag, Chapter 9, pp. 115-125, 2007.
- Wang 2007** Wang Y., Lee H. “Generalizing TOPSIS for Fuzzy Multicriteria Group Decision Making” Computers and Mathematics with Applications 53, pp. 1762-1771, 2007.
- Zelai 2006** Zelaieta O., Lizarralde R. “Mecanizado Virtual de Piezas de Geometría Compleja: Ahorro de Tiempo y Dinero en Todas las Fases del Proyecto” Revista Metal Univers, Junio 2006 ,pp.37, 2006.

3.11. Conclusiones del Capítulo

Capítulo 4

Inteligencia Computacional

4.1. Introducción

Los sistemas inteligentes están diseñados para adquirir información, aplicarla y utilizarla, a fin de generar comportamientos asimilables al conocimiento de la inteligencia humana. Algunas capacidades inteligentes incluyen aprender de experiencias previas, utilización de memoria, inferir y razonar en situaciones inesperadas o nuevas basándose en información incompleta.

La base de conocimientos (*knowledge base*) de un sistema inteligente (*Knowledge Based System* o KBS) está formada de conocimientos y habilidades que han sido adquiridas y puestas en un formato estructurado que puede ser utilizado como la base de futuras decisiones. De esta forma la base de conocimientos se va continuamente refinando y actualizando como resultado de nueva información que es recibida de fuentes externas y de inferencias o decisiones al interpretar el significado de esta información.

El *Soft Computing* o Inteligencia Computacional, es un área importante de estudios en lo concerniente a los sistemas inteligentes y los KBS. A partir de que Lofti Zadeh propuso la definición de *Soft Computing* como una mezcla de distintos métodos que aprovechan la tolerancia que conllevan la imprecisión y la incertidumbre, para conseguir manejabilidad, robustez y soluciones de bajo coste [Zadeh 1994], el *Soft Computing* se ha consolidado como un nuevo campo dentro de las ciencias de la computación que abarca un conjunto de metodologías caracterizadas por su inspiración en los sistemas biológicos para resolver problemas relacionados con el mundo real [Carreño 2006].

Soft Computing es un enfoque que permite tratar las situaciones prácticas reales en un ambiente de incertidumbre e imprecisión de la misma forma que suelen hacerlo los seres humanos, es decir, en base a inteligencia, sentido común, consideración de analogías y aproximaciones.

Los componentes principales del *Soft Computing* son la lógica difusa, la computación neuronal, y los algoritmos genéticos. Es decir, cualquier proceso de computación que expresamente incluya imprecisión en los cálculos en uno o más niveles, y que permita cambiar la granularidad del problema o suavizar los objetivos de optimización en cualquier etapa, se define como perteneciente a este campo [Li 1998].

4.2. Resumen del Capítulo

En este capítulo, se presenta una breve introducción a las principales técnicas que componen el *Soft Computing*. En la Sección 4.3 se introducen los conceptos más relevantes de los algoritmos genéticos seguidos por las redes neuronales (Sección 4.4). En 4.5 se introducen los principios de lógica difusa. Finalmente se presentan los Sistemas Híbridos.

4.3. Algoritmos Genéticos

La mayoría de los sistemas de Inteligencia Artificial (IA), son muy estáticos. Una gran parte de ellos sólo pueden resolver un problema en específico, debido a la arquitectura con que han sido diseñados, si el problema cambia, estos sistemas podrían tener dificultades para adaptarse a ellos, ya que el algoritmo que originalmente llegaría a la solución del problema ahora podría ser incorrecto o menos eficiente.

Los algoritmos genéticos (AG) han sido creados para luchar contra estos problemas. La arquitectura que implementan estos algoritmos es capaz de adaptarse a una amplia serie de problemas. Un algoritmo genético es un método de solución de problemas que utiliza la genética como su modelo de resolución. Es una técnica de búsqueda para encontrar soluciones aproximadas a problemas de investigación y optimización. Combina la supervivencia del más apto entre estructuras de secuencias con un intercambio de información estructurado, aunque aleatorio, para constituir así un algoritmo de búsqueda que tenga algo de las genialidades de las búsquedas humanas [Gold 1989].

La mayoría de las ocasiones se busca la óptima solución en un conjunto específico de soluciones. El espacio de todas las soluciones factibles, se denomina espacio de búsqueda. Donde cada punto en el espacio representa una posible solución, por lo tanto cada posible solución puede ser marcada por su valor de idoneidad, dependiendo de la definición del problema. Con los algoritmos genéticos se busca la mejor solución entre un número de posibles soluciones representadas por un punto en el espacio de búsqueda [Sivan 2008]. La Figura 4.1 muestra la representación gráfica de los algoritmos genéticos.

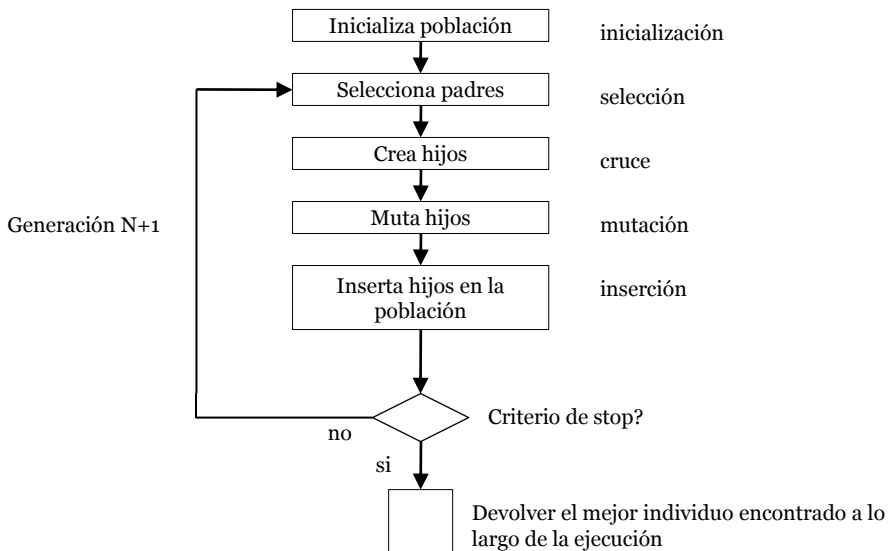


Figura 4.1: Representación gráfica de un algoritmo genético.

4.3.1. Historia de los Algoritmos Genéticos

En la década de 1950 a 1960 se estudió de forma independiente los sistemas evolutivos con la idea de que la evolución podría ser utilizada como una herramienta de optimización para problemas de ingeniería. La idea de estos sistemas fue desarrollar una población de soluciones posibles a un problema dado, usando operadores inspirados por la variación genética natural y la selección natural.

Se atribuye la invención y desarrollo de estos algoritmos a John Holland y un grupo de investigadores de la Universidad de Michigan en la década de

1960 a 1970. El objetivo original de Holland no fue el diseño de algoritmos para resolver problemas específicos, sino estudiar formalmente el fenómeno de la adaptación como ocurre en la naturaleza y el desarrollo de las formas en que los mecanismos de adaptación natural podrían ser importados en los sistemas informáticos.

Después en 1975 John Holland escribe un libro llamado “Adaptación en sistemas naturales y artificiales” [Holland 1992] donde plasma la idea de cómo aplicar los principios de la evolución natural de problemas de optimización, construyendo así el primer algoritmo genético.

En los últimos años ha habido una interacción extendida entre los investigadores que estudian diferentes métodos de computación evolutiva, y los límites entre los AG, las estrategias de evolución, la programación evolutiva, así como otros enfoques evolutivos se han roto en cierta medida. Hoy, los investigadores suelen utilizar el término “algoritmo genético” para describir algo muy lejos de la concepción original de Holland [Sivan 2008].

4.3.2. Operadores Genéticos

El algoritmo genético procede de la forma siguiente [Merelo 1998]:

1. Analiza y evalúa a cada uno de los genes.
2. Permite a cada uno reproducirse, de acuerdo con su puntuación.
3. Empareja a los individuos de la población, haciendo que intercambien material genético.

Cada uno de los pasos consiste en una actuación sobre las cadenas de bits, es decir, a la aplicación de un operador a una cadena binaria, a estos pasos se les denomina operadores genéticos, y hay tres principales: de selección, *crossover* o recombinación y mutación.

Operadores Genéticos de Selección

El operador de Selección es el encargado de transmitir y conservar aquellas características que se consideran valiosas a lo largo de las generaciones. El principal medio para que la información útil se transmita es que los individuos mejor adaptados (mejor valor de función de evaluación) tengan más probabilidades de reproducirse. Sin embargo, es necesario también incluir un factor aleatorio que permita reproducirse a individuos que aunque no estén muy bien

adaptados, puedan contener alguna información útil para posteriores generaciones con el objeto de mantener así también una cierta diversidad en cada población [Caball 2009]. Los operadores para selección más conocidos son los de *ranking*, de torneo y de ruleta (Figura 4.2).

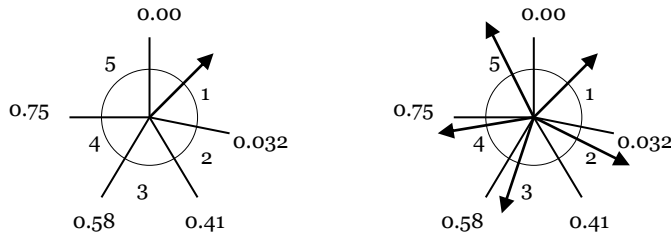


Figura 4.2: Ejemplo de operador de selección tipo ruleta (adaptado de [Reeve 2004]). Suponga que hay 5 cadenas (*strings*) en una población con puntuaciones (*fitnesses*) de 32,9,17,25 respectivamente. La probabilidad de selección de cada individuo es proporcional al área de un sector de una ruleta (o equivalentemente, al ángulo subtendido en el centro). Los números en los radios de la rueda son probabilidades acumulativas para el uso de un generador de números pseudo-aleatorio. En la izquierda se encuentra la selección estándar de la ruleta, con un solo apuntador que tiene que ser girado 5 veces. En la derecha se encuentra el muestreo universal estocástico (SUS), usando 5 apuntadores de espacio equivalente conectados; un giro provee 5 opciones.

Durante la evaluación, se decodifica el gen, convirtiéndose en una serie de parámetros de un problema, donde a partir de éstos parámetros se halla la solución del problema, y se le da una puntuación a esa solución en función de lo cerca que esté de la mejor solución [Mitch 1999]. A esta puntuación se le llama *fitness*.

El *fitness* determina siempre los cromosomas que se van a reproducir, y aquellos que se van a eliminar, pero hay varias formas de considerarlo para seleccionar la población de la siguiente generación: usar el orden, o rango, y hacer depender la probabilidad de permanencia o evaluación de la posición en el orden. En algunos casos, el *fitness* no es una sola cantidad, sino diversos números, que tienen diferente consideración. Basta con que el *fitness* forme un orden parcial, es decir, que se puedan comparar dos individuos y decir cuál de ellos es mejor. Esto suele suceder cuando se necesitan optimizar varios objetivos.

Una vez evaluado el *fitness*, se tiene que crear la nueva población teniendo en cuenta que los buenos rasgos de los mejores individuos se transmitan a esta.

Operador Genético *Crossover*

El operador de cruce permite realizar una exploración de toda la información almacenada hasta el momento en la población, y combinarla para crear mejores individuos. Existen diversos métodos de cruce donde todos tienen como fin desarrollar nuevos y mejores individuos, es recomendable que tanto la codificación como la técnica de cruce se hagan de manera que las características buenas se hereden [Gil 2006]. Entre estos métodos de cruce para la selección más conocidos se tiene:

Cruce por punto. Donde se selecciona una posición en las cadenas de los progenitores, y se intercambian los genes a la izquierda de esta posición.

Cruce de n puntos. Se seleccionan varias posiciones (n) en las cadenas de los progenitores y se intercambian los genes a ambos lados de estas posiciones.

Cruce Uniforme. Se realiza un test aleatorio para decidir de cuál de los progenitores se toma cada posición de la cadena.

Cruces para permutación. Existe una familia de cruces específicas para los problemas de permutación, puede ser parcial, de orden o de ciclo.

Mutación

En la Evolución, una mutación es un suceso bastante poco común; en los AG objetivo de la mutación es producir nuevas soluciones para un problema dado, a partir de soluciones ya existentes. En la mayoría de los casos las mutaciones son letales, pero en promedio, contribuyen a la diversidad genética de la especie. En un algoritmo genético tendrán el mismo papel, y la misma frecuencia. Una vez establecida la frecuencia de mutación, por ejemplo, uno por mil, se examina cada bit de cada cadena cuando se vaya a crear la nueva criatura a partir de sus padres (normalmente se hace de forma simultánea al *crossover*). Si un número generado aleatoriamente está por debajo de esa probabilidad, se cambiará el bit (es decir, de 0 a 1 ó 1 a 0). Sino, se dejará como está. Dependiendo del número de individuos que haya y del número de bits por individuo, puede resultar que las mutaciones sean extremadamente raras en una sola generación.

4.3.3. Ventajas, Limitaciones y Aplicaciones de AG

Ya que los AG toman una parte importante en la resolución de y optimización de problemas, estos poseen ciertas ventajas, aplicaciones y limitantes que

indican los criterios para su uso.

Ventajas de los AG

- Amplio espacio de solución. Paralelismo.
- Fácil de descubrir un óptimo global.
- El problema tiene funciones multiobjetivo.
- Sólo utiliza funciones de evaluación.
- Fácilmente modificada para diferentes problemas.
- Puede ser utilizado para una amplia variedad de problemas de optimización.
- Optimiza con variables sencillas o discretas.
- Proporciona una lista de variables óptimas, no una solución única.
- Puede codificar las variables y trabajar con ellas de manera numérica, experimental, o analítica.

Limitaciones de los AG

Al crear un AG se debe definir una representación del problema. El lenguaje utilizado para especificar soluciones candidatas debe ser robusto; es decir, debe ser capaz de tolerar cambios aleatorios que no produzcan constantemente errores o resultados sin sentido[Gil 2006].

El problema de cómo escribir la función objetivo debe considerarse para que se pueda alcanzar una mayor aptitud y signifique una solución mejor para el problema dado. Si se elige mal una función objetivo o se define de manera inexacta, puede que el AG sea incapaz de encontrar una solución al problema, o puede acabar resolviendo el problema equivocado.

Deben elegirse cuidadosamente los otros parámetros de un AG como el tamaño de la población, la mutación, cruzamiento, el tipo y fuerza de la selección. Si el tamaño de la población es demasiado pequeño, puede que el AG no explore suficientemente el espacio de soluciones para la solución óptima.

No es recomendable utilizar AG en problemas resolubles de manera analítica, debido a que los métodos analíticos tradicionales consumen mucho menos

tiempo y potencia computacional que los AG y, a diferencia de los AG, a menudo está demostrado matemáticamente que ofrecen la única solución exacta.

Aplicaciones de los Algoritmos Genéticos

Ampliamente utilizados para la resolución de problemas de Modelos de Ingeniería, se utilizan desde aplicaciones cotidianas de arte hasta avanzados campos de aplicación en la Ingeniería y ciencia. Algunas de las aplicaciones se listan como:

- Optimización.
- Procesamiento de imágenes.
- Tecnología Láser.
- Medicina.
- Física de estado sólido.
- Aeronáutica.
- Robótica.
- Control.
- Aprendizaje máquina.

Viabilidad de Uso

Los AG han demostrado ser eficientes en estas aplicaciones, sin embargo no en todos los problemas podrá considerarse su uso ya que se deben de tomar en cuenta ciertos aspectos como:

- Su espacio de búsqueda, es decir, sus posibles soluciones. Debe de estar delimitado dentro de un cierto rango.
- Debe permitir definir una función de aptitud que indique qué tan buena o mala es una cierta respuesta.
- Las soluciones deben codificarse de una forma que resulte relativamente fácil de implementar en el ordenador [Gil 2006].

4.4. Redes Neuronales Artificiales

Las redes neuronales artificiales (RNA) son modelos matemáticos basados en el paradigma del aprendizaje y cuyo origen está inspirado en la forma en la que funcionan las redes de neuronas biológicas del cerebro humano. Las RNA tienen dos similitudes básicas con el cerebro: la red adquiere el conocimiento de su entorno mediante un proceso de aprendizaje (algoritmo) y almacena la información aprendida mediante fuerzas asociadas a las conexiones entre neuronas, llamadas pesos sinápticos.

A nivel celular, el cerebro humano se compone principalmente de células nerviosas llamadas neuronas, que son unidades paralelas relacionadas entre sí mediante una red de conexiones. El cerebro puede verse como un sistema altamente complejo, no lineal y con capacidad de procesamiento paralelo de información. Tiene la propiedad de organizar las neuronas con el fin de conseguir ciertos cálculos a una velocidad de varios órdenes de magnitud superior al más rápido ordenador [Delgado 2009].

La actividad que una unidad de procesamiento o neurona artificial realiza en un sistema de este tipo es simple [Correa 2006]. Normalmente, consiste en sumar los valores de las entradas (*inputs*) que recibe de otras unidades conectadas a ella, comparar esta cantidad con el valor umbral y, si lo iguala o supera, enviar activación o salida (*output*) a las unidades a las que esté conectada. Tanto las entradas que la unidad recibe como las salidas que envía dependen a su vez del peso o fuerza de las conexiones por las cuales se realizan dichas operaciones.

4.4.1. Historia de las Redes Neuronales Artificiales

En 1936, Alan Turing fue el primero en estudiar el cerebro desde el punto de vista computacional [Flores 2008], si bien los trabajos pioneros para la construcción de modelos matemáticos que imitasen el comportamiento de las neuronas biológicas se deben al neurofisiólogo Warren McCulloch y Walter Pitts, matemático, que presentaron en 1943 uno de los primeros modelos abstractos de una neurona artificial [McCull 1943]. Años más tarde Donald Hebb en 1949 propuso una ley explicativa del aprendizaje neuronal, conocida como regla de Hebb, que se convirtió en la antecesora de las modernas técnicas de entrenamiento de redes neuronales artificiales.

A partir de estas aportaciones iniciales, durante la década de 1950 a 1960 surgieron nuevos desarrollos, destacando el trabajo de Rosenblatt en 1958 [Rosen 1958], quien desarrolló una red conocida como Perceptrón un modelo sencillo capaz de generalizar el conocimiento, es decir, tras aprender una serie de

patrones podía reconocer otros similares aunque no se le hubieran presentado previamente. En el año 1960 Bernard Widrow y Ted Hoff desarrollan una importante variación del algoritmo de aprendizaje del perceptrón, que dio lugar al modelo “*Adaptive Linear Elements*” [Widrow 1960], que constituyó la primera red neuronal aplicada a un problema real utilizada para quitar los ecos de las líneas telefónicas, la cual continuó utilizándose durante años. En 1977, destaca el trabajo de James Anderson con el Asociador Lineal y su extensión conocida como “*Brain State in a Box*”, que permitió modelar funciones arbitrariamente complejas [Ander 1977]. Durante la década de los 80’s se desarrollaron diversas redes autoasociativas, especializadas en la detección de clusters de ejemplos, como la red Neurocognitrón de Fukushima 1980 o la red LVQ de Kohonen en 1977. En 1982 John Hopfield presentó su trabajo sobre redes neuronales en la academia Nacional de Ciencias, en el cual describe una variante del asociador lineal inspirada en la minimización de la energía presente en los sistemas físicos, conocida como la red Hopfield [Hopf 1982]. Rumelhart desarrolla en 1986 un algoritmo de aprendizaje supervisado para redes neuronales artificiales conocido como Backpropagation [Rumel 1986], el cual ofrece una solución poderosa para la construcción de redes más complejas, al evitar los problemas observados en el aprendizaje del perceptrón simple. Este algoritmo constituye desde entonces una de las reglas de aprendizaje de mayor utilización en el ámbito de la neurocomputación para el entrenamiento de la red conocida como perceptrón multicapa. La investigación sobre redes neuronales continuó perfeccionándose organizándose así la primera conferencia *Neural Networks for Computing* en 1987 organizada por el Instituto Americano de la Física, y el primer congreso “*International Neural Network Society*” en 1987.

Las redes neuronales han experimentado un importante desarrollo en los últimos años. Las investigaciones se centran en la combinación de dos paradigmas de aprendizaje, el paradigma conexionista y los modelos simbólicos consiguiendo sinergias entre la capacidad de procesamiento y aproximación de las redes, que pueden llegar a soluciones muy buenas, rápidas y con poca información de partida, y el potencial explicativo de los sistemas basados en el conocimiento.

4.4.2. Funcionamiento de las RNAs

Una neurona artificial es un procesador elemental que recibe una serie de entradas con ponderaciones diferentes que al agregarse producen el nivel de excitación. La activación de la neurona artificial se produce mediante la aplicación de una función de activación, generalmente no lineal a cada nivel de excitación proporcionando una salida.

La función de activación determina el estado de actividad de una neurona transformando la excitación en un valor de activación, que es la salida de la neurona, y cuyo rango se encuentra generalmente en el intervalo $(0,1)$ ó $(-1,1)$ ya que se considera que una neurona puede estar totalmente activa en (1) o totalmente inactiva en $(0,-1)$.

4.4.3. Características de una RNA

En una red neuronal artificial, se consideran los siguientes aspectos:

Diseño Estructural. Contempla el tipo de neurona, sus entradas y funciones de activación. El tipo de conexiones entre estas, su tipología y la selección de un conjunto adecuado de datos para el entrenamiento y para la verificación o prueba.

Aprendizaje. Consiste en el proceso de adaptación de los pesos para que la respuesta de la red sea la deseada tanto para los datos de los conjuntos de entrenamiento y verificación como para otros datos de entrada no contemplados en los conjuntos antes dichos. Los métodos de aprendizaje se clasifican en dos grupos: supervisado en donde la red se entrena a base de ejemplos con entrada y salida, y no supervisado, en donde se utilizan ejemplos que incluyen sólo la entrada.

- Aprendizaje Supervisado. En este tipo de aprendizaje los datos de entrenamiento están constituidos por patrones de parejas de entrada y salida, y consiste en la optimización de una función que mide las discrepancias entre las salidas calculadas por la red y las salidas esperadas. Para conseguir esta optimización, se ajustan los valores de los pesos de las conexiones en forma iterativa, de acuerdo con algún criterio, generalmente basado en técnicas matemáticas de optimización no lineal. El objetivo del entrenamiento es encontrar los pesos óptimos para minimizar el error entre los valores.
- Aprendizaje No Supervisado. En el aprendizaje no supervisado, el conjunto de datos de entrenamiento consiste sólo en los patrones de entrada. Es decir, en este tipo de aprendizaje se pueden distinguir dos grandes grupos de redes: redes de pesos fijos y redes de aprendizaje competitivo.
 - En las redes de pesos fijos, los pesos son preestablecidos y pre calculados, por ello no resultan adecuadas en aplicaciones en ambientes cambiantes.

- Las redes de aprendizaje competitivo, se caracterizan por que sólo se adaptan los pesos de la neurona que más se activa en competencia con las demás. La neurona ganadora es aquella cuyo vector de pesos se parece más al ejemplo de entrada actual.
- Aprendizaje Híbrido. Es una mezcla de los anteriores. Unas capas de la red tienen un aprendizaje supervisado y otras capas de la red tienen un aprendizaje de tipo no supervisado.
- Aprendizaje reforzado. Es un aprendizaje con características del supervisado y el no supervisado. No se proporciona una salida deseada, pero sí se le indica a la red en cierta medida el error que comete, aunque sea un error global.

Recuperación de la Información. Consiste en recuperar la información almacenada en los pesos durante el proceso de entrenamiento para que sea utilizada en la aplicación, donde los datos de entrada pueden o no coincidir con los presentados en el proceso de aprendizaje. Si los datos de entrada no coinciden con los de entrenamiento, se espera que la respuesta de la red, previamente entrenada, sea lo más aproximada posible a la respuesta esperada.

4.4.4. Analogía de Funcionamiento de una Red Neuronal¹.

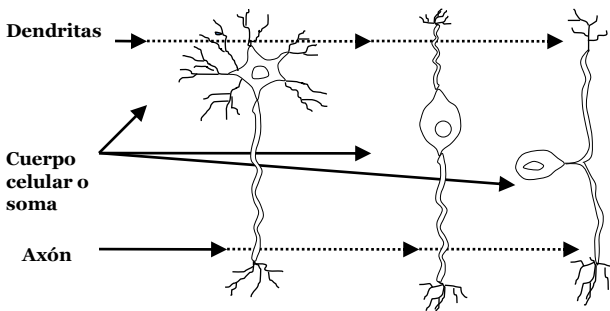


Figura 4.3: Estructura de una neurona biológica.

La transmisión de información entre neuronas se realiza a través de señales de distinta naturaleza como son eléctrica y química; la señal eléctrica prevalece

¹Adaptado de [Flores 2008]

en el interior de la neurona mientras que la señal química lo hace en el exterior.

La señal generada por la neurona y transportada a lo largo del axón es un impulso eléctrico, mientras que la señal que se transmite entre los terminales axónicos de una neurona y las dendritas de otras es de tipo químico, basada en la liberación de unas sustancias químicas complejas, denominadas neurotransmisores por parte de la neurona pre-sináptica es decir, aquella que emite señales. Estas sustancias atraviesan el vacío sináptico de forma que si la neurona post-sináptica o la que recibe señales posee en las dendritas o en el soma canales sensibles a los neurotransmisores liberados, los fijará, permitiendo el paso de determinados iones como el sodio, calcio y potasio a la través de la membrana celular. El resultado final de todo este proceso es la emisión por parte de la neurona post-sináptica de trenes de impulsos cuya frecuencia varía en función de la cantidad de neurotransmisores recibidos, entre otros factores. La frecuencia de disparo oscila entre 1 y 100 pulsos por segundo, si bien algunas neuronas pueden llegar a los 500 durante periodos de tiempo reducidos. El número de pulsos y su frecuencia determina la cantidad de neurotransmisores liberada que, a su vez, producirá nuevas excitaciones o inhibiciones en otras células nerviosas.

Una de las características que diferencian a las neuronas del resto de células vivas es su capacidad para comunicarse, si bien la intensidad de las sinapsis varía a lo largo del tiempo, esta plasticidad sináptica constituye en buena medida el proceso de aprendizaje.

Durante el desarrollo de un ser vivo, el sistema neuronal se va modificando, al objeto de adquirir condiciones que no son innatas al individuo, de esta forma, se establecen nuevas conexiones, se rompen otras y, se modelan las intensidades sinápticas. Este tipo de modificaciones sinápticas, especialmente las referentes a la intensidad de las conexiones, constituyen la base de las redes neuronales artificiales.

4.4.5. Tipos de Redes Neuronales

Existen diversos tipos de redes neuronales, dependiendo de la arquitectura, organización y disposición de las neuronas de la red. Los parámetros fundamentales de la red son: el número de capas, la cantidad de neuronas por capa, el grado de conectividad y el tipo de conexiones entre neuronas. Los criterios más comunes para clasificar una RNA son la arquitectura y el tipo de aprendizaje. En cuanto a la arquitectura, existen dos posibilidades distintas. Si la arquitect-

Tabla 4.1: Analogía entre la neurona biológica y la neurona artificial.

Neurona Biológica	Neurona Artificial
Señales que llegan a la sinapsis	Entradas a la neurona
Carácter excitador o inhibitor de las sinapsis de entrada	Pesos de entrada
Activación o no de la neurona	$Net_j = \sum_{i=0}^n W_{ij}(t) x_i(t)$
Activación o no de la neurona	Función de activación
Respuesta de la neurona	Función de salida

tura de la red no presenta ciclos, es decir, no se puede trazar un camino de una neurona a sí misma, la red se llama unidireccional (*feedforward*). Por el contrario, si se puede trazar un camino de una neurona a sí misma la arquitectura presenta ciclos. Este tipo de redes se denominan recurrentes o realimentadas (*recurrent*). El otro criterio más habitual para clasificar las redes neuronales es el tipo de aprendizaje que se utilice. Hay cuatro clases de aprendizaje distintos: supervisado, no supervisado, híbrido y reforzado (Sección 4.4.3).

Redes Neuronales Unidireccionales (*Feedforward*)

Perceptrón. Es el tipo de red más simple, tiene dos capas entrada y salida y no posee capas ocultas, tiene propagación hacia delante y como función de activación utiliza una función de umbral. Su entrenamiento es supervisado en base a un conjunto de ejemplos binarios con valores de entrada y salida conocidas, lo que permite ajustar los pesos de conexión entre la capa de entrada y la capa de salida para obtener el valor y la respuesta esperada. La información fluye de la capa de entrada a la de salida.

Adaline y Madaline. Este modelo de red fue desarrollada por Bernie Widrow en 1960 [Widrow 1960], y son muy similares a un perceptrón lineal con la particularidad de que se agrega un factor de tendencia y que se añade una condición bipolar, tal que si la salida del combinador adaptativo lineal es positiva, la salida del Adaline es +1 y si es negativa la salida será -1, y esto genera una condición de salida binaria del Adaline. El Adaline (Figura 4.4) tiene una neurona de salida y la Madaline es una combinación de módulos Adaline básicos, lo que permite superar algunas de sus limitaciones. Su entrenamiento es supervisado y para el ajuste de pesos se considera minimizar el error cuadrático medio con la regla delta.

Perceptrón Multicapa Es una red de propagación hacia delante con capa

de entrada, capa de salida, y una o más capas ocultas. Esta red es entrenada con el algoritmo de retropropagación, lo que precisa de funciones de activación continuas y diferenciables. Este método de aprendizaje utiliza la regla delta generalizada para adaptar los pesos. Existen distintas versiones de este algoritmo y por ende hay diferentes tipos de arquitectura y conexiones que pueden ser implementadas.

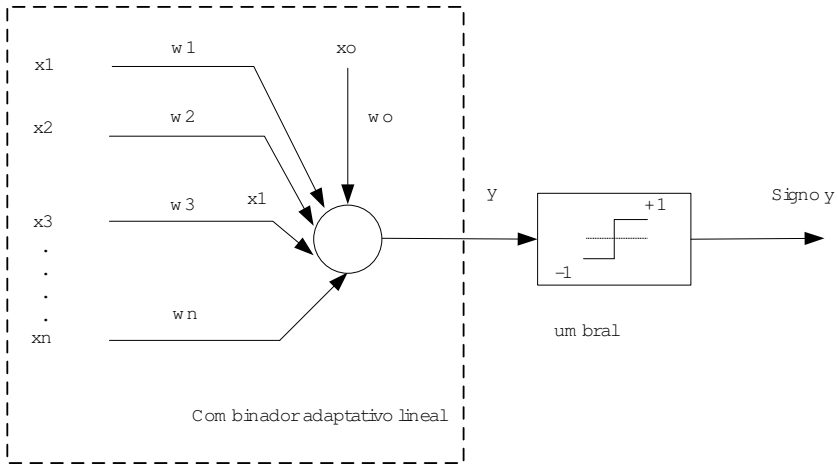


Figura 4.4: Arquitectura de una RN ADALINE.

Redes Neuronales Recurrentes (*recurrent*)

Estas redes tienen como característica común la recurrencia, ya que al existir conexiones de retroalimentación entre las neuronas, la red opera como un sistema dinámico. Los modelos más referidos son las memorias asociativas y la Red de Hopfield.

Red de Hopfield. En este tipo de RNA cada neurona de la capa de entrada está conectada con una neurona de la capa media, y cada neurona de la capa media emite una sola conexión hacia la capa de salida. Y estas conexiones (capa de entradas - capa media, y capa media - capa de salida) no implican cálculo de pesos sinápticos ni de valores umbral.

Memoria asociativa bidireccional. (Figura 4.5) Consta de dos capas de procesadores elementales completamente interconectados entre capas, pero no existe conexión intercapa, las conexiones entre capa son bidireccio-

nales, con pesos iguales en ambos sentidos, y la información fluye a través de estas conexiones. Los pesos en este tipo de red se obtienen a partir del conjunto de ejemplos que se quieren almacenar.

Estas arquitecturas recurrentes utilizan funciones de activación de umbral, cada unidad puede tomar los estados 0 y 1, dependiendo de si la estimulación total recibida supera determinado umbral.

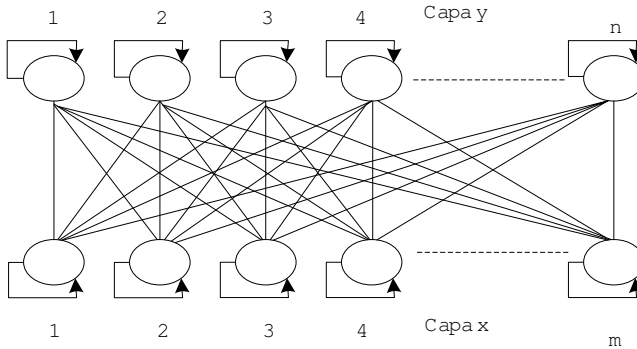


Figura 4.5: Arquitectura de una Memoria Asociativa Bidireccional.

Máquina de Boltzmann. Este tipo de redes recurrentes son de adaptación probabilística, con dinámica según el enfriamiento estocástico. Aprenden a reconstruir los patrones de entrada que memorizan durante el entrenamiento, que es supervisado. Su arquitectura es sin capas con interconexión total y usa funciones de activación de umbral donde cada unidad puede tomar valores 0 ó 1, dependiendo de que el estímulo recibido supere determinado umbral. En general se utilizan en problemas dinámicos no estables.

Redes Neuronales de Función de Base Radial

La estructura de esta red (Figura 4.6) es de propagación hacia adelante con tres capas, que son: entrada, oculta, y salida. No hay entrenamiento para la capa oculta, donde de hecho no existen pesos, y hay entrenamiento supervisado, con la regla delta, en la capa de salida. Otra diferencia, es que la capa oculta tiene una función de transferencia de tipo Gausiano, con dos parámetros específicos para cada neurona, que se calculan directamente de los ejemplos de entrenamiento.

Un aspecto clave aquí es el número de neuronas en la capa oculta. Suele tomarse una por ejemplo de entrenamiento, o una por clase si se produce una agrupación de los ejemplos. La aplicación de estas redes se orienta más a la aproximación de funciones y a la clasificación. Su entrenamiento es rápido, en comparación con el de propagación.

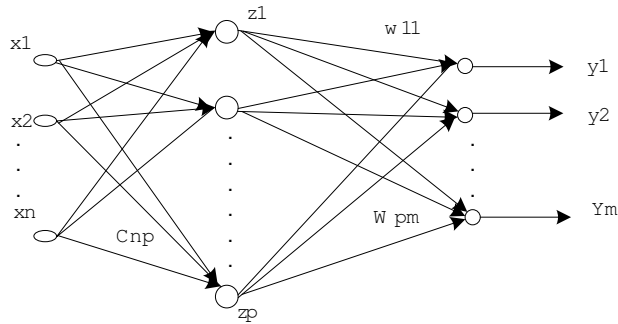


Figura 4.6: Arquitectura de una RNA de Función de Base Radial (RBF).

Redes de Kohonen (RNAs Auto Organizadas)

Las redes auto organizadas o *self organizing maps* SOMs, son redes que se organizan en dos capas, en la primera están constituidas por las neuronas de entrada y la segunda consiste en un conjunto de neuronas que se suelen distribuir en un plano (i, j, k) , donde los primeros índices indican la posición de la neurona en la capa de salida y el tercer índice la neurona de la capa de entrada. El entrenamiento es no supervisado de tipo competitivo, es decir, la red no encontraría regularidades o clases, sólo con los datos de entrada y modificará sus pesos para ser capaz de reconocer este tipo de regularidades o clases.

La neurona que más se excita para una determinada entrada se considera la ganadora de la competición, y adapta sus pesos para hacerse más ganadora aún. Las demás neuronas no modifican sus pesos. Esto produce que las demás neuronas cercanas en la capa de salida se exciten para ejemplos cercanos, lo que produce el efecto de auto organización.

El objetivo de este tipo de red es clasificar los patrones de entrada en grupos de características similares, incluso sin conocer el número concreto de clases,

de manera que cada grupo activará siempre las mismas salidas.

Una de las cualidades de este tipo de red es la incorporación a la regla de aprendizaje de cierto grado de sensibilidad con respecto al vecindario. Esto ocasiona que el número de neuronas que no aprendan desaparezca, aumentando así su capacidad de extraer o mapear características topológicas de los datos.

Aprendizaje del Vector de Cuantización (LVQ)

Es un algoritmo de aprendizaje supervisado que construye en forma adaptiva el vector de cuantización a partir de un conjunto de entrenamiento. Se ingresa un conjunto etiquetado de vectores representativos, denominados centros, y para cada nuevo vector se busca la referencia más próxima vía un ajuste de posición de los centros. Es una red de dos capas, de entrada y una de salida que debe tener igual número de unidades al número de centros, y en su entrenamiento no hay retro alimentación y el ajuste de los pesos es programado.

Modelos Híbridos

Debido a la complejidad de problemas en la ingeniería las redes neuronales estas, se utilizan y construyen de manera muy particular ligadas al problema a tratar. Lo que deriva en el surgimiento de nuevos tipos de redes y soluciones que aunque se inspiren bases en los modelos antes mencionados no se pueden asociar directamente a ellos. Estos modelos se conocen como Híbridos.

Red Neuronal Modular

Se utiliza para clasificar el análisis de experimentos. Esta red permite dividir el problema fundamental, la identificación de eventos, en dos acciones paralelas: identificar eventos particulares por módulos y procesado por módulos (redes expertas en determinados eventos). Estas redes actúan en paralelo tratando los eventos y acciones individualmente y luego compiten entre sí conectándose con una red de puerta que coordina el funcionamiento de los módulos.

Red Neuronal Eisteniana

Basada a partir de la interpretación de Einstein sobre los espectros de los fotones [Perlov 1997], donde estos espectros son una superposición de diversas señales electromagnéticas provenientes de distintos orígenes. El espectro se puede representar con una distribución de probabilidad de fotones. Esta red está compuesta por la interacción de dos subsistemas, los cuales son de modelación y de asociación. Es una red considerada de varias capas hacia delante pero con entrenamiento no supervisado.

4.5. Lógica Difusa

La lógica difusa o lógica *Fuzzy*, es un elemento de la inteligencia artificial que tiene aplicaciones importantes en la resolución de problemas. Introducida en 1965 y basada en la observación de que la gente puede tomar buenas decisiones de acuerdo con información imprecisa y no numérica.

Los modelos difusos son métodos matemáticos de representación de vaguedad. Tienen la capacidad de reconocer, representar, manipular, interpretar y utilizar datos e información que son vagos o que carecen de precisión. Estos métodos tratan con el razonamiento y las tomas de decisiones a un nivel superior que las redes neuronales.

En el Capítulo 5 se presentarán ampliamente los principios básicos de la lógica difusa debido a su utilización en el desarrollo de esta tesis.

4.6. Sistemas Híbridos

La resolución a complejos problemas de Ingeniería, pueden ser resueltos mediante la aplicación de sistemas que combinen el conocimiento, las técnicas, y metodologías de varias fuentes para tratar el problema de forma integral, estos sistemas, poseen la habilidad de adaptarse a un dominio específico donde aprenden a hacer lo mejor en entornos cambiantes. En ocasiones, la resolución de problemas es realizable por métodos convencionales, sin embargo, es posible la aplicación de sistemas que desarrollen sinergias y complementariedades. Un ejemplo de ello son los sistemas híbridos, que utilizan la combinación de métodos como redes neuronales, lógica difusa, algoritmos genéticos y sistemas expertos; donde reconocen patrones y se adaptan a ellos, junto con sistemas de inferencia que incorporan el conocimiento humano y desarrollan la toma de decisiones [Gajate 2009].

Las aplicaciones de sistemas híbridos en el diseño de sistemas inteligentes han demostrado ser efectivas en la actualidad, así como lo han sido las redes neuronales, los algoritmos genéticos, y la lógica difusa, en la solución de sus correspondientes aplicaciones en forma independiente, en donde cada uno de estos métodos de solución tiene sus ventajas e inconvenientes. A fin de aprovechar esas ventajas que ofrecen y reducir sus desventajas se han propuesto técnicas híbridas para complementar, si la aplicación lo requiere, el mecanismo de resolución del problema [Kasab 1998].

4.6.1. Ejemplos de Sistemas Híbridos

Sistemas Híbridos Neuro-Expertos

Se llama así a la combinación de sistemas expertos y redes neuronales, los sistemas expertos representan un lógico y simbólico enfoque, mientras que las redes neuronales utilizan un método numérico y asociativo para imitar modelos en un sistema biológico. Los avances de estos dos sistemas, han alcanzado el punto en donde sus ventajas puedan ser combinadas dentro de un sistema más poderoso; utilizando los componentes de las redes neuronales cuando las reglas no son conocidas, los tópicos son muy complejos o no se tiene disponible a un experto.

Si los datos de entrenamiento pueden ser generados, el sistema será capaz de leer una gran cantidad información igual o mejor que un sistema experto, además al combinar ambos sistemas se tendrá como ventaja un incremento de la velocidad de operación [Warwi 1998].

Sistemas Híbridos Neuro-Difusos

La necesidad de crear sistemas inteligentes que se adapten a las necesidades del mundo real, han llevado a la investigación sobre sistemas híbridos que combinen la lógica difusa y las redes neuronales; las cuales, mediante la interconexión de capas utilizadas en redes neuronales van aprendiendo desde cero, mientras que la lógica difusa proporciona un marco basado en reglas difusas, conjuntos y factores de pertenencia.

La combinación de estos dos sistemas permite obtener un sistema sencillo basado en la estructura neuronal y en donde se apliquen el conjunto de reglas *if – then* de los sistemas difusos. Por otro lado, una de las características de este sistema es la tolerancia a fallos, la cual ya era parte de ambos sistemas en un principio, la eliminación de una neurona o de una regla difusa no destruye el sistema necesariamente, sino que este continuará modelando y controlando debido a las características propias de su arquitectura.

Dentro de la arquitectura de este sistema, existe el enfoque *Neuro-Centric* y el *Fuzzy-Centric*, el primero de ellos da mayor importancia al enfoque neuronal de la descripción. Las características difusas son utilizadas para aumentar el comportamiento completo de la red. En el enfoque *Fuzzy-Centric* las redes neuronales son utilizadas como herramientas auxiliares para determinar las funciones de pertenencia o para cambiar el conjunto de reglas adaptativamente.

La lógica difusa es de gran ayuda para corregir deficiencias neuronales como velocidad de convergencia y el mínimo local [Méndez 2004].

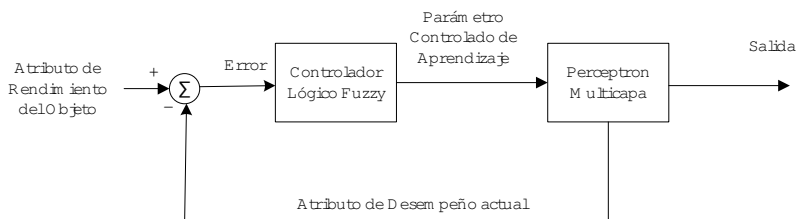


Figura 4.7: Red Neuronal Multicapa controlada por lógica difusa.

Sistemas Híbridos *Neuro-Fuzzy Centric*

Un sistema de este tipo permite sacar (*carry out*) la inferencia con la estructura neuronal que posee y ajustar los parámetros difusos utilizando un aprendizaje neuronal, la lógica difusa puede ser utilizada para traducir el razonamiento heurístico y el conocimiento, a partir de descripciones cualitativas y obtener descripciones cuantitativas. Aunque la lógica difusa puede capturar los rasgos principales de un proceso dado, las reglas y las funciones de pertenencia son usualmente difíciles de obtener, en relación a ello, las RNAs pueden ser entrenadas para extraer las reglas y las funciones de pertenencia a partir de los datos del dominio.

Sistemas Híbridos Neuro-Genéticos

En este sistema los algoritmos genéticos pueden ser utilizados para proveer un buen conjunto inicial de pesos para las redes neuronales, para entrenar completamente las RNAs o para encontrar la estructura óptima de la red. Después de que la población inicial sea generada, un individuo con un alto *fitness* o aptitud, será seleccionado para mezclarse y evolucionar. El mejor individuo será conservado en cada generación y sus genes serán decodificados para los pesos de la red. Después el método del gradiente descendiente es aplicado para la propagación inversa en el aprendizaje de la red neuronal.

Sistemas Híbridos Genético-Difusos

En este sistema, el algoritmo genético se modifica para que base su función en la lógica difusa modificando su función de evaluación y sus operadores genéticos, proporcionando de esta manera un entorno difuso para el proceso de

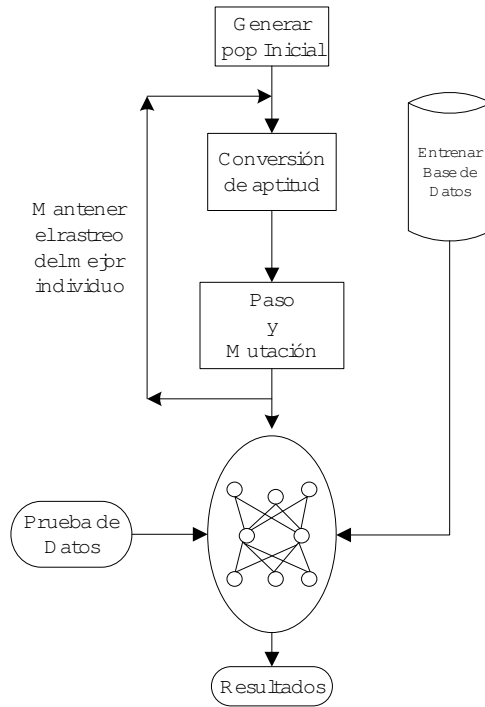


Figura 4.8: Redes Neuronales basadas en el Algoritmo Genético.

optimización, lo que induciría a ciertos cambios en la programación del mismo y tendría un efecto en la forma de reproducción junto a la supervivencia de los individuos con un determinado rango de aceptación, y por lo tanto en los resultados de su evaluación de acuerdo a un umbral establecido [Casta 2008].

4.7. Aplicaciones de Inteligencia Computacional en los Procesos de Selección

El uso de técnicas de inteligencia computacional en los procesos selección asistida es un tema reciente con una amplia gama de aplicaciones que ha demostrado el mejoramiento en los resultados de selección cuando son comparados con técnicas convencionales.

4.7. Aplicaciones de Inteligencia Computacional en los Procesos de Selección

Comenzando por el uso de técnicas de lógica difusa, se pueden encontrar aplicaciones que permitan la selección asistida de proveedores para la fabricación, como se muestra en [Vinodh 2011], donde se desarrolló un modelo conceptual para la selección de proveedores abarcando diversos criterios y subcriterios. El proceso utiliza un enfoque de análisis de red difusa (fuzzy ANP). Al validar los resultados contra la realización del análisis de sensibilidad, así como la validación basada en un cuestionario, se demostró que la aplicación del ANP difuso es factible en la práctica y adaptable en el escenario industrial contemporáneo. Otro ejemplo de selección es el presentado en [Naga 2008], donde utilizaron un proceso de jerarquía analítico (AHP, Capítulo 3) difuso, Fuzzy-AHP, para la selección asistida de procesos de mecanizado rápido de herramienta para el moldeo por inyección. La metodología propuesta permite la selección adecuada del proceso de mecanizado rápido dados los requisitos del molde. También identifica las características esenciales que podrían ser modificadas para mejorar la capacidad de fabricación, logrando así una mejor calidad y menor costo y tiempo de las piezas moldeadas. En [Zera 2010] se propone un enfoque de cuatro etapas basado en un análisis envolvente de datos (DEA, Capítulo 3) en un ambiente difuso para clasificaciones de preferencia global. Una aplicación del sistema de voto preferencial muestra cómo el nuevo modelo se puede aplicar para clasificar un conjunto de alternativas.

En cuanto al uso de los algoritmos genéticos, se puede mencionar el trabajo presentado en [Siva 2011] donde se propone un nuevo enfoque para hacer la selección alternativa de procesos de fabricación y la asignación de la tolerancia al mismo tiempo. La selección se lleva a cabo con uso de algoritmos genéticos para optimización multiobjetivo, *Non dominated Sorting Genetic Algorithm* (NSGA-II) y *Multi Objective Particle Swarm Optimization* (MOPSO). Este documento considera al mismo tiempo la reducción al mínimo de apilado de tolerancias, el coste de fabricación y la pérdida de calidad como funciones objetivo.

Asimismo, diversas aportaciones en los procesos de selección se han hecho mediante el uso de Redes Neuronales Artificiales. El documento en [Butdee 2009] presenta un sistema de planificación de procesos para la fabricación de matrices basado en la técnica de redes neuronales. El sistema incluye una base de conocimientos extraídos directamente de la geometría de la matriz. Los resultados del sistema son el diseño de moldes y mecanizado. El sistema ha sido probado con éxito, se ha demostrado que el sistema puede reducir el tiempo de planificación y respuesta. En [Deb 2011] se desarrolló una metodología de planificación de procesos asistida por computadora (CAPP) de piezas mecanizadas. La selección de operaciones de mecanizado y la planificación de puesta

en marcha se han automatizado por esta metodología. Para ello se utilizó una red neuronal supervisada formada con el conocimiento previo de dominio en forma de reglas básicas.

4.8. Conclusiones

Se presentaron diversos componentes del *Soft Computing*: las redes neuronales, los algoritmos genéticos, y la lógica difusa. Cada uno de ellos posee una estructura que permite la asimilación del conocimiento mediante el uso de algoritmos. Como se mostró en la revisión de aplicaciones de Inteligencia Computacional en los Procesos de Selección, los componentes del *Soft Computing* permiten asimilar el comportamiento humano para la resolución de problemas en base a aproximaciones, sentido común, consideración de analogías o inteligencia. La aplicación y el éxito de cada uno de los componentes del *Soft Computing* dependerá de la aplicación deseada.

Bibliografía

- Ander 1977** Anderson J., Ritz S., and Jones R. “Distinctive features, categorical perception, and probability learning: Some applications of a neural model” *Psychological Review* 84, pp.413-451, 1977.
- Butd 2009** Butdee S., Noomtong C., Tichkiewitch S. “A Process Planning System with Feature Based Neural Network Search Strategy for Aluminum Extrusion Die Manufacturing” King Mongkut’s University of technology North Bangkok Press, pp. 137-157, 2009.
- Caball 2009** Caballero R., Molina J., Luque M., Torrico A., y Gómez T. “Algoritmos Genéticos para la Resolución de Problemas de Programación por Metas Entera. Aplicación a la Economía de la Educación” Universidad de Málaga, 2009.
- Carreño 2006** Carreño M. “Técnicas Innovadoras para la Evaluación del Riesgo Sísmico y su Gestión en Centros Urbanos: Acciones ex-ante y ex-post” UPC, pp. 221-228, 2006.
- Casta 2008** Castañeda E., Garmendia L., Santos M. “Algoritmos Genéticos Difusos: Una Aproximación Práctica para la Creatividad Computacional” Segundo Congreso Internacional de Matemáticas en la Ingeniería y la Arquitectura, pp.279-290, 2008.
- Correa 2006** Correa R. “Redes Neuronales Artificiales en Ingeniería Física y Nuclear: Caracterización de espectros PIXE ” Universidad de Granada, Capítulo 1, pp.7-27, 2006.
- Deb 2011** Deb S., Parra R., Ghosh K. “An Integrated and Intelligent Computer-Aided Process Planning Methodology for Machined Rotationally Symmetrical Parts” *International Journal of Advanced Manufacturing Systems*, Volume 13, Issue 1, pp. 1-26, 2011.
- Delgado 2009** Delgado S. “Nuevos Algoritmos de Entrenamiento y Visualización de Redes Neuronales Auto-organizativas para su Aplicación en Teledetección” Universidad Politécnica de Madrid, Capítulo 2, pp.7-70, 2009
- Flores 2008** Flores R., Fernández J., “Redes neuronales artificiales fundamentos teóricos y aplicaciones prácticas” *Netbiblo*, pp.11-86, 2008.
- Gajate 2009** Gajate M. “Modelado y Control Neuroborroso de Procesos de Taladrado de Alto Rendimiento” Universidad de Salamanca, Capítulo 1, pp. 1-14, 2009.

- Gestal 2006** Gestal M., Rivero D., Rabuñal J., Dorado J., Pazos A. “Introducción a los algoritmos genéticos y la programación Genética” Universidad de la Coruña, Capítulo 1, pp.1-25, 2006.
- Gil 2006** Gil N. “Algoritmos Genéticos” Universidad Nacional de Colombia, 2006.
- Gold 1989** Goldberg D. “Genetic Algorithms in Search, Optimization Machine Learning” Addison-Wesley, first edition, Chapter 1, pp. 1-25, 1989.
- Hebb 1949** Hebb D. “The Organization of Behaviour” Wiley, New York, 1949.
- Holland 1992** Holland H. “Adaptation in Natural and Artificial Systems, An Introductory Analysis with Applications to Biology, Control, and Artificial Intelligence” MIT Press, Second Edition, 1992.
- Hopf 1982** Hopfield J. “Neural networks and physical systems with emergent collective computational abilities” Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA 79, 2554-2558, 1982.
- Kasab 1998** Kasabov N. “Foundations of neural networks, fuzzy systems and knowledge engineering” MIT press, Chapter 6, pp. 421-474, 1998.
- Li 1998** Li X., Ruan D., and Wal A. “Discussion on soft computing at FLINS” International Journal of Intelligent Systems 13, pp.287-300, 1998.
- McCull 1943** McCulloch W., Pitts W. “A Logical Calculus of Ideas Immanent in Nervous Activity” Bulletin of Mathematical Biophysics 5, pp.115-133, 1943.
- Merelo 1998** Merelo J. “Informática Evolutiva” Universidad de Granada, pp. 1-46, 1998.
- Méndez 2004** Méndez R. “Aplicación de las Redes Neuronales en la Predicción de las Curvas de Destilación ASTM D86 en las Gasolinas Automotrices” Revista Ingeniería UC, Vol. 11, Nmero 1, pp.27-34, 2004.
- Mitch 1999** Mitchell M. “An Introduction to Genetic Algorithms” MIT Press, Fifth Edition, Chapter 1, pp.1-25, 1999.
- Naga 2008** Nagahanumaiah, Subburaj K. and Ravi B. “Computer aided rapid tooling process selection and manufacturability evaluation for injection mold development” Computers in Industry 59, pp. 262276, 2008.

- Perlo 1997** Perlovsky L., Plum C., Franchi P., Tichovolsky e., Choi D., Weijers B. "Einsteinian NN for Spectrum Estimation" *Neural Networks* 10, 1541-1546, 1997.
- Reeve 2004** Reeves C., Rowe J. "Genetic Algorithms Principles and Perspectives: A Guide to GA " Kluwer Academic Publishers, Second Edition, Chapter 2, pp.19-60, 2004.
- Rosen 1958** Rosenblatt F. "The Perceptron: A Probabilistic Model for Storage and Organization in the Brain" *Psychological Review*, Vol. 56, No.6, pp.386-408, 1958.
- Rumel 1986** Rumelhart D., Hinton G., and Williams R. "Learning Representations by Back-Propagating Errors" *Nature* 323, pp.533-536, 1986.
- Sasch 2009** Sascha O., Hermoso R., Vasirani M. "Algoritmos Genéticos" Universidad Rey Juan Carlos, Capítulo 12, 2009.
- Sivan 2008** Sivanandam S., Deepa S. "Introduction to Genetic Algorithms" Springer-Verlag, Chapter 2, pp 15-39, 2008.
- Siva 2011** Sivakumar K., Balamurugan C. and Ramabalan S. "Simultaneous optimal selection of design and manufacturing tolerances with alternative manufacturing process selection" *Computer-Aided Design* 43, pp. 207218, 2011.
- Vinodh 2011** Vinodh S., Anesh R. and Gautham S. 'pplication of fuzzy analytic network process for supplier selection in a manufacturing organisation" *Systems with Applications* 38, pp. 272280, 2011.
- Warwi 1997** Warwick K., Ekwue A., Aggarwal R. "Artificial Intelligence Techniques in Power Systems" *IEE Colloquium* 354, pp.68, 1997.
- Widrow 1960** Widrow B., Hoff M. "Adaptive switching circuits" *Proceedings IRE Wescon Conference, Part 4*, pp.96-104, 1960.
- Zadeh 1994** Zadeh L. "Soft Computing and Fuzzy Logic" *IEEE Software* 11, 6, pp. 48-56, 1994.
- Zeraf 2010** Zerafat A., Emrouznejad A., Mustafa A., Al- Eraqi A. "Aggregating Preference Ranking with Fuzzy Data Envelopment Analysis" *Knowledge-Based Systems* 23, pp. 512-519, 2010.
- Zilou 2001** Zilouchian A., Jamshidi M. "Intelligent Control Systems Using Soft Computing Methodologies" *CRC Press* pp.1-63, 2001.

4.8. Conclusiones

Capítulo 5

Lógica Difusa

5.1. Introducción

La lógica difusa, definida como la teoría del razonamiento incierto, impreciso o aproximado, proporciona un sistema que permite la representación y procesamiento de los conceptos que las personas expresan; y el cual supone que pueden existir muchos valores de verdad, utilizando variables lingüísticas que posibilitan el establecimiento de conjuntos con restricciones o límites elásticos que se mantienen vigentes para un universo de discurso dado en un momento determinado.

Constituye un sistema que está dedicado a la formalización de modos de razonamiento que son aproximados y no exactos. Introducida por L.A. Zadeh en 1965 [Zadeh 1965] para procesar y manipular información y datos afectados de incertidumbre o imprecisión no probabilística, es una de las herramientas más utilizadas para la resolución de problemas.

La aplicación de un sistema difuso es útil en sistemas que no se pueden resolver por algún método simple o matemático conocido. Es utilizado cuando se tienen datos ambiguos y se necesita el conocimiento de un experto, cuando se tiene un sistema y ciertas partes de éste son desconocidas, no confiables, o cuando el ajuste de una variable podría provocar el desajuste de otras.

En este capítulo se da una introducción a los sistemas difusos enfatizando la diferencia entre los conjuntos difusos y conjuntos lógicos. Se presenta una breve historia de la lógica difusa y se explican las principales características de un sistema difuso, es decir, las variables lingüísticas, funciones de pertenencia,

grados de pertenencia y otros conceptos relevantes a manera de introducción de la aplicación de un algoritmo difuso para la selección de procesos que se verá en el siguiente capítulo.

5.2. Resumen del Capítulo

En la Sección 5.3 se presentan los antecedentes de la teoría de conjuntos difusos. En 5.4 se introduce el concepto de conjunto difuso. Más adelante, las Secciones 5.5 y 5.6 presentan los conceptos de variable lingüística y grado de pertenencia. La Sección 5.7 muestra los diversos tipos de funciones de pertenencia y su representación. Finalmente en la Sección 5.8 se introducen las funciones de agregación.

5.3. Antecedentes

Los primeros trabajos realizados bajo el enfoque difuso fueron publicados por el Dr. Lotfi A. Zadeh en 1965 investigando los conjuntos difusos cuya finalidad era tratar con sistemas que no permitían un análisis convencional y cuyas aplicaciones pudieran aplicarse sistemas lingüísticos, psicológicos sociológicos, filosóficos y campos afines [Valve 1993].

La primera aplicación industrial del control difuso fue creada por L.P. Holmblad a finales de 1970 quien junto con J.J. Ostergaard fabricó un sistema de control para un horno de cemento [Rusell 2007]. E.Mandani y S. Assilian en 1974 desarrollaron un controlador para una máquina de vapor, utilizando para ello reglas lingüísticas para acelerar la velocidad de adaptación [Manda 1975]. En 1978 los profesores K. Asai, K.Tanaka, T. Terano y sus estudiantes comenzaron a publicar trabajos sobre autómatas borrosos y sistemas de aprendizaje [Okuda 1978], basados en información difusa. Por otra parte C.B.Brown en 1979 investiga sobre la aplicación de la lógica difusa en el análisis estructural [Brown 1977].

Una de las mayores aplicaciones industriales fue desarrollada en Francia en el año 1979 por Didier Dubois y Prade [Dubois 1979] aunque implementada en 1982, en la cual se aplicó el concepto de conjuntos difusos a las condiciones de tráfico . En Japón se alrededor de 1979 Seiji Yasunobu y Soji Miyamoto, de la compañía Hitachi, comienzan a investigar la posibilidad de crear un sistema para el funcionamiento del metro de Sendai, el cual exitosamente inicia operación en 1987. Este sistema aplicó la lógica difusa para controlar la aceleración,

frenar y parar.

En los Estados Unidos, dos importantes contribuciones fueron realizadas por Enrique Ruspini del centro de Inteligencia Artificial y por James Bezdek de la Universidad de Florida. Ruspini escribe el primer artículo sobre agrupamiento difuso en 1969 y Bezdek desarrolla algoritmos difusos de reconocimiento de patrones en 1978 y también fue uno de los primeros en reconocer la importancia de desarrollar aplicaciones que combinaban la lógica difusa y las redes neuronales [Bezdek 1978].

Las aplicaciones de la lógica difusa a través de los años han encontrado uso en electrodomésticos, cámaras fotográficas, elevadores y robots, iniciando en Japón, hoy día, un gran número de paradigmas, conceptos e implementaciones han sido objeto del concepto difuso, sin embargo la principal aportación de la lógica difusa es en la creación de una metodología utilizada para explotar la tolerancia a la imprecisión.

5.4. Conjuntos Difusos

El término conjunto analizado desde un punto de vista probabilístico, es uno de los más utilizados en matemáticas, el cual se define como un conjunto de datos, o una colección de objetos determinados, donde, generalmente se utilizan letras o números. Los elementos que pertenecen a un determinado conjunto, son llamados elementos del conjunto, los cuales comparten un atributo o propiedad que los caracteriza y los distingue de otros objetos que carecen de ella [Díaz 2005].

Un conjunto difuso es un conjunto sin un límite definido. La transición entre “pertenecer a un conjunto” y “no pertenecer a un conjunto” es gradual y esta transición suave es caracterizada por una función de pertenencia. Los conjuntos definidos de forma imprecisa desempeñan un papel importante en el pensamiento humano, particularmente en los dominios del reconocimiento de patrones, de la comunicación de la información y de la abstracción [Zadeh 1965].

La teoría de conjuntos difusos es una herramienta importante para modelar incertidumbre y para procesar información vaga o subjetiva en modelos matemáticos, se define como la colección de elementos escogidos entre los de un universo, en los que los elementos de dicho conjunto pueden pertenecer parcialmente a este [Chalco 2009].

Un conjunto difuso A se define como una función de pertenencia que enlaza

o empareja los elementos de un dominio o universo de discurso X con elementos del intervalo $[0, 1]$:

$$-A : X \in [0, 1] \tag{5.1}$$

Cuanto más cerca esté $A(x)$ del valor 1, mayor será la pertenencia del objeto x al conjunto A , donde los valores de pertenencia varían entre 0 (no pertenece en absoluto) y 1 (pertenencia total).

5.5. Variable Lingüística

El concepto de variable lingüística fue introducido por Zadeh en 1975, para proporcionar una base para el razonamiento aproximado, así: “por una variable lingüística se quiere decir que se trata de una variable cuyos valores son palabras u oraciones en un lenguaje natural o artificial. La motivación para el uso de palabras o de oraciones en lugar de números es que las caracterizaciones lingüísticas son, en general, menos precisas que los valores numéricos” [Rutkow 2002].

Algunos ejemplos de variables lingüísticas pueden ser: la velocidad, el espesor, las perforaciones, la complejidad, etc. Se llama valor lingüístico a las diferentes clasificaciones que se efectúan sobre la variable lingüística: en el caso de la complejidad de una pieza, se podría dividir el universo de discurso en los diferentes valores lingüísticos: “sencilla”, “media” y “compleja”. Como se verá más adelante, cada valor lingüístico tendrá un conjunto difuso asociado.

5.6. Grados de Pertenencia

Se define como un valor que establece el punto de transición entre 0 y 1 entre las condiciones del conjunto difuso, es decir es un valor que le permite a un elemento pertenecer a un conjunto difuso independientemente del valor que este tenga, mientras este valor numérico se encuentre entre los números 0 y 1, incluyéndolos.

El grado de pertenencia se define mediante la función característica asociada al conjunto difuso (también llamada función de pertenencia): para cada valor que pueda tomar un elemento o variable de entrada x la función característica $\mu_A(x)$ proporciona el grado de pertenencia de ese valor de x al conjunto difuso A [Pérez 2005].

5.7. Funciones de Pertenencia

Las funciones de pertenencia indican el grado en que cada elemento de un universo conocido dado, pertenece a dicho conjunto. Son una forma de representar un conjunto difuso sobre un universo. Se representa como un gráfico con formas geométricas diversas, siendo las más comunes las triangulares y trapezoidales. Generalmente se denota por μ y puede adoptar valores entre 0 y 1 con la mayor pertenencia en 1 y con la mínima en 0.

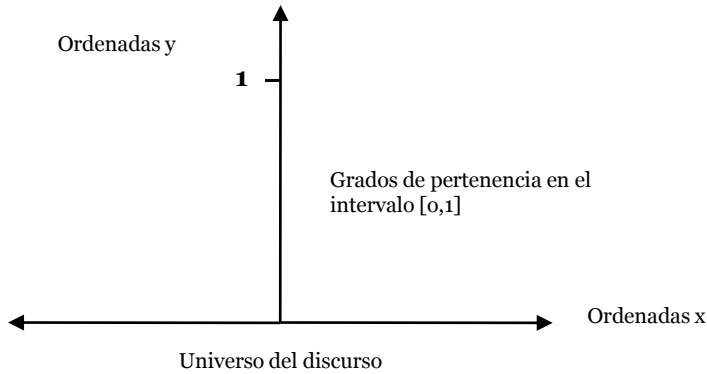


Figura 5.1: Representación gráfica de grados de pertenencia.

A continuación se presentan los diversos tipos de funciones de pertenencia y su representación¹.

5.7.1. Función de Pertenencia Triangular

Una función de pertenencia triangular, $Tri_{c\alpha\beta}[c, \alpha, \beta](x)$, se define según la expresión 5.2, siendo c su centro, $\alpha \geq 0$ su ancho izquierdo y, $\beta \geq 0$ su ancho derecho.

$$\mu Tri_{c\alpha\beta}[c, \alpha, \beta](x) = \begin{cases} \frac{1 - (c - x)}{\alpha} & \text{si } (c - \alpha) \leq x < c \\ \frac{1 - (x - c)}{\beta} & \text{si } c \leq x \leq (c + \beta) \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (5.2)$$

¹Adaptado de [Barragan 2009]

Otra forma más común de definir la función de pertenencia triangular, es mediante la identificación de los tres puntos del triángulo, $Tri[a, b, c](x)$, con $a \leq b \leq c$. En este caso la función de pertenencia vendrá dada por la expresión 5.3.

$$\mu_{Tri}[a, b, c](x) = \begin{cases} \frac{x - a}{b - a} & \text{si } a < x \leq b \\ \frac{c - x}{c - b} & \text{si } b < x < c \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (5.3)$$

Las Funciones de pertenencia triangulares son continuas y definen un conjunto borroso normal, convexo y con soporte finito, por lo que pueden emplearse para representar números borrosos.

Si la función de pertenencia se define mediante la ecuación 5.2, el soporte vendrá dado por $(c - \alpha, c + \beta)$ y el núcleo coincidirá con c ; mientras que si se define mediante 5.3, el soporte será (a, c) y el núcleo coincidirá con b .

En la Figura 5.2 se representa la función de pertenencia $Tri_{c\alpha\beta}[4, 10, 3](x)$, que también puede declararse como $Tri[-6, 4, 7](x)$, y cuyo universo de discurso es $X \in [-10, 10]$. El soporte de esta función coincide con el intervalo $(-6, 7)$, y su núcleo con el valor 4.

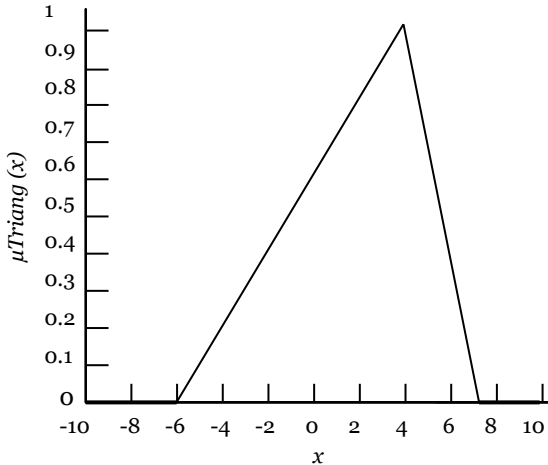


Figura 5.2: Función de pertenencia triangular.

5.7.2. Función de Pertenencia Trapezoidal

Una función de pertenencia trapezoidal, $Trap_{ab\alpha\beta}[a, b, \alpha, \beta](x)$, se define según la expresión 5.4, siendo $[a, b]$, con $a \leq b$, su intervalo de confianza o núcleo, $\alpha \geq 0$ su ancho izquierdo, y $\beta \geq 0$ su ancho derecho.

$$\mu_{Tri}[a, b, \alpha, \beta](x) = \begin{cases} \frac{1 - (a - x)}{\alpha} & \text{si } (a - \alpha) \leq x < b \\ \frac{1 - (x - b)}{\beta} & \text{si } a \leq x \leq b \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (5.4)$$

Al igual que en el caso anterior, la función de pertenencia trapezoidal también puede definirse mediante los 4 puntos característicos del trapecio, $Trap[a, b, c, d](x)$, siendo $a \leq b \leq c \leq d$. En este caso la función de pertenencia trapezoidal vendrá dada por la expresión:

$$\mu_{Tri}[a, b, c, d](x) = \begin{cases} \frac{x - a}{b - a} & \text{si } a < x < b \\ 1 & \text{si } b \leq x \leq c \\ \frac{d - x}{d - c} & \text{si } c < x < d \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (5.5)$$

La función de pertenencia trapezoidal es continua y define un conjunto difuso normal, convexo y con soporte finito, por lo que se puede emplear para representar un número borroso.

Si la función de pertenencia se define mediante 5.4, el soporte vendrá dado por $(a - \alpha, b + \beta)$ y el núcleo coincidirá con el intervalo $[a, b]$; mientras que si se define mediante 5.5, su soporte será (a, d) y su núcleo $[b, c]$.

En la Figura 5.3 se presenta un ejemplo de función de pertenencia trapezoidal con universo de discurso $X \in [-10, 10]$. En este caso, dicha función puede definirse como $Trap_{ab\alpha\beta}[-5, 1, 3, 7](x)$, o como $Trap[-8, -5, 1, 8](x)$. El soporte de dicha función coincide con el intervalo $(-8, 8)$, y su núcleo con $[-5, 1]$.

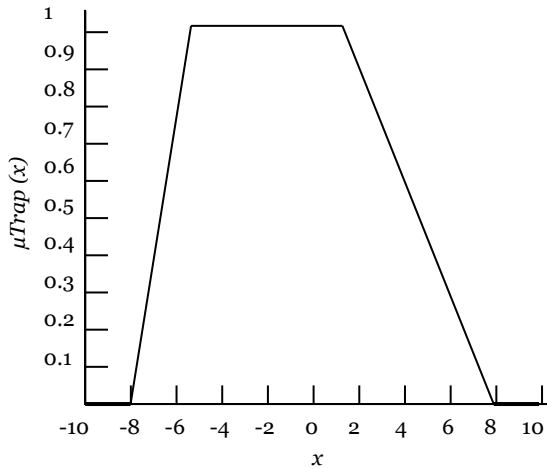


Figura 5.3: Función de pertenencia trapezoidal.

5.7.3. Función de Pertenencia Gaussiana

Una función de pertenencia gaussiana, $Gauss[c, \beta](x)$, se define según la expresión:

$$\mu Gauss[c, \beta](x) = e^{-\left(\frac{x-c}{\beta}\right)^2} \quad (5.6)$$

siendo c su centro y $\beta > 0$ el ancho de la función de pertenencia.

La función de pertenencia gaussiana es continua, simétrica respecto a c , y define un conjunto difuso normal y convexo. El núcleo de la función de pertenencia coincide con c y su soporte es infinito. Como la función de pertenencia tiende asintóticamente a cero por sus dos extremos, es decir, cumple la condición del límite $\lim_{|x| \rightarrow \infty} \mu Gauss(x) = 0$, se puede emplear para representar un número cuasi-borroso.

El soporte de la función gaussiana es infinito, ya que dicha función tiende a cero de forma asintótica por ambos extremos; sin embargo, a veces es necesario disponer de un valor infinito para el soporte. Se puede suponer que el soporte es finito si se desprecian valores de pertenencia menores de cierta cantidad. Un criterio práctico razonable es suponer el soporte de la función gaussiana como todos aquellos valores de x para los que $\mu_A(x)$ será mayor del 10% del máximo grado de pertenencia posible para $\mu_A(x)$ (si A es un conjunto normalizado y

normal). Otra posibilidad es suponer el soporte como una función del ancho de la campana (β), o aproximar su valor mediante la comparación de la función gaussiana con otras funciones de pertenencia de soporte finito, como la función de pertenencia triangular.

En la Figura 5.4 se muestra un ejemplo de función de pertenencia gaussiana, cuyo centro es $c = 3$ y su ancho $\beta = 1,5$. Un posible valor finito para el soporte podría ser $(c - 2\beta, c + 2\beta)$, lo que en este ejemplo correcto sería $(0,6)$.

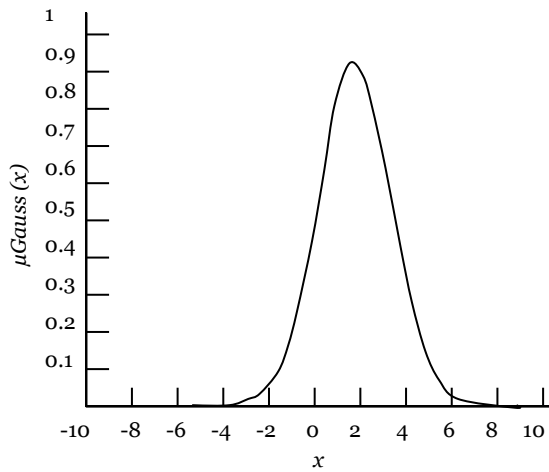


Figura 5.4: Función de pertenencia Gaussiana.

5.7.4. Función de Pertenencia Gaussiana Doble

Una función de pertenencia gaussiana doble, $Gauss2[c_1, c_2, \beta_1, \beta_2](x)$, se define de forma asimétrica mediante el producto de dos funciones gaussianas según el conjunto de ecuaciones. La parte izquierda de la función se define con el conjunto de parámetros $[c_1, \beta_1]$, con $\beta_1 > 0$, y la parte derecha de la misma con los parámetros $[c_2, \beta_2]$, con $\beta_2 > 0$. Si $c_1 \leq c_2$, el núcleo coincidirá con el intervalo $[c_1, c_2]$ y el conjunto difuso A será normal, mientras que si $c_1 > c_2$, el núcleo será nulo y el conjunto difuso A será no normal.

$$\mu_{Gauss2}[c_1, c_2, \beta_1, \beta_2](x) = \mu_1(x)\mu_2(x) \quad (5.7)$$

siendo

$$\mu_1(x) = \begin{cases} \mu_{Gauss2}[c_1, \beta_1](x) & \text{si } x < c_1 \\ 1 & \text{si } x \geq c_1 \end{cases} \quad (5.8)$$

y

$$\mu_2(x) = \begin{cases} \mu_{Gauss2}[c_2, \beta_2](x) & \text{si } x > c_2 \\ 1 & \text{si } x \leq c_2 \end{cases} \quad (5.9)$$

La función gaussiana doble es continua y convexa. Aunque su soporte es infinito, al igual que la función gaussiana, cumple con la condición de límite, por lo que siempre que sea normal, es decir, siempre que $c_1 \leq c_2$, podrá utilizarse para representar un número cuasi-borroso.

En la Figura 5.5 se muestran varios ejemplos de funciones de pertenencia gaussiana dobles. Si $c_1 < c_2$, la forma de esta función de pertenencia será similar a $\mu_{Gauss2-A}(x)$. Si $c_1 = c_2$ se obtendrá una forma gaussiana pero con los brazos asimétricos cuyo núcleo coincide con los centros, como $\mu_{Gauss2-B}(x)$. Si por el contrario, $c_1 > c_2$, la función será no normal y su núcleo será nulo como $\mu_{Gauss2-C}(x)$.

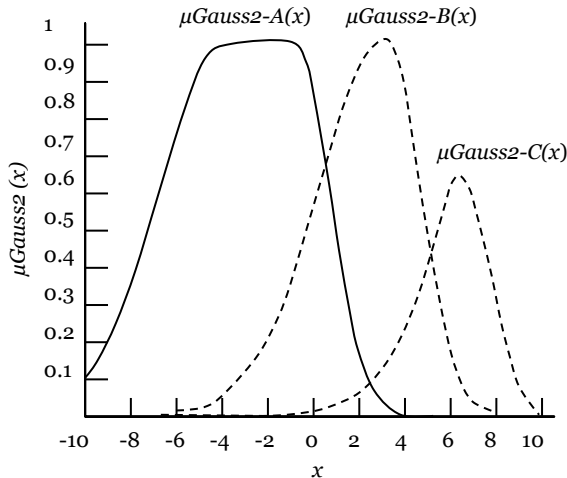


Figura 5.5: Función de pertenencia Gaussiana doble.

5.7.5. Función de Pertenencia de Campana

Una función de pertenencia campana, $Campana[\alpha, \beta, c](x)$, se define según la expresión 5.10, siendo c el centro de la función de pertenencia, y $\alpha > 0$ y $\beta \neq 0$ dos parámetros de ajuste. El parámetro α tiene relación con el ancho de la función por su parte baja o pies, mientras que el parámetro β , normalmente positivo, tiene relación con el ancho de la función de pertenencia por la zona alta, u hombros. Si $\beta < 0$, la función de pertenencia toma la forma de una campana invertida y puede ser interesante para predicados de tipo negación (*Si x no es...*).

$$\mu_{Campana}[\alpha, \beta, c](x) = \frac{1}{1 + \left| \frac{x - c}{\alpha} \right|^{2\beta}} \quad (5.10)$$

La función de pertenencia campana es continua, simétrica con respecto a c , y define un conjunto difuso normal y convexo. Aunque su soporte es infinito, cumple la condición de límite siempre que $\beta > 0$, por lo que en dicho caso podrá utilizarse para representar números cuasi-borrosos. Para obtener un valor finito del soporte puede aplicarse un razonamiento similar al utilizado con la función de pertenencia gaussiana.

En la Figura 5.6 se pueden ver dos funciones de pertenencia campana, una con $\beta = 3$ y la otra con $\beta = -3$. En ambos casos se ha tomado $\alpha = 4$ y $c = -2$.

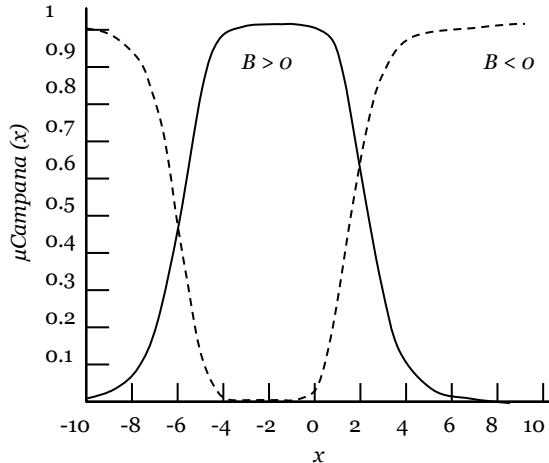


Figura 5.6: Funciones de pertenencia Campana.

5.7.6. Función de Pertenencia S .

La función de pertenencia S , $S[a, b](x)$, siendo $a \leq b$, permite establecer una transición suave desde un valor de pertenencia nulo a un valor de pertenencia uno. Se define según la expresión 5.11.

$$\mu_S[a, b](x) = \begin{cases} 0 & \text{si } x \leq a \\ 2\left(\frac{x-a}{b-a}\right) & \text{si } a < x \leq \frac{a+b}{2} \\ 1 - 2\left(\frac{b-x}{b-a}\right) & \text{si } \frac{a+b}{2} < x < b \\ 1 & \text{si } x \geq b \end{cases} \quad (5.11)$$

La función de pertenencia S es continua y define un conjunto difuso normal y convexo.

Su soporte viene dado por el intervalo (a, ∞) , por lo que es infinito. Al no cumplir la condición de límite no puede emplearse para representar números borrosos, sin embargo, esta función de pertenencia es muy utilizada para representar las etiquetas lingüísticas del tipo *mayor de*.

En la Figura 5.7 se muestra un ejemplo de función S , con $a = -2$ y $b = 6$.

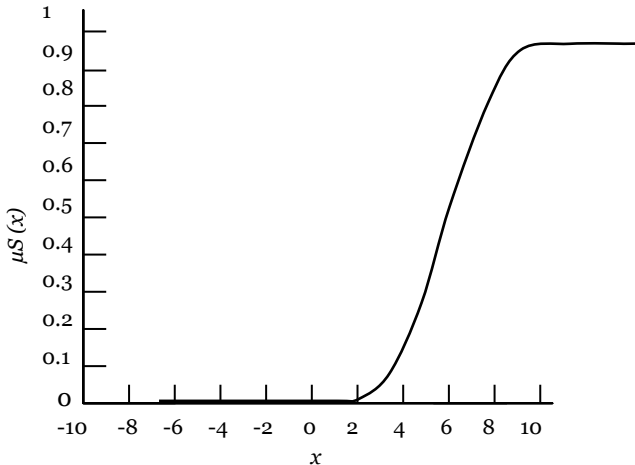


Figura 5.7: Funciones de pertenencia S .

5.7.7. Función de Pertenencia Z

La función de pertenencia Z , $Z[a, b](x)$, siendo $a \leq b$, permite establecer una transición suave desde un valor de pertenencia uno a un valor de pertenencia nulo. Se define según la expresión 5.12.

$$\mu_Z[a, b](x) = \begin{cases} 1 - 2\left(\frac{x - a}{a - b}\right)^2 & \text{si } a < x < \frac{a + b}{2} \\ 2\left(\frac{b - x}{a - b}\right)^2 & \text{si } \frac{a + b}{2} \leq x < b \\ 0 & \text{si } x \geq b \end{cases} \quad (5.12)$$

La función de pertenencia Z es continua y define un conjunto difuso normal y convexo.

Su soporte es $(-\infty, b)$, por lo que es infinito. Al no cumplir la condición de límite esta función puede emplearse para representar números borrosos, sin embargo, esta función de pertenencia es muy utilizada para representar las etiquetas lingüísticas del tipo *menor de*.

En la Figura 5.8 se muestra un ejemplo de función Z con $a = -2$ y $b = 6$.

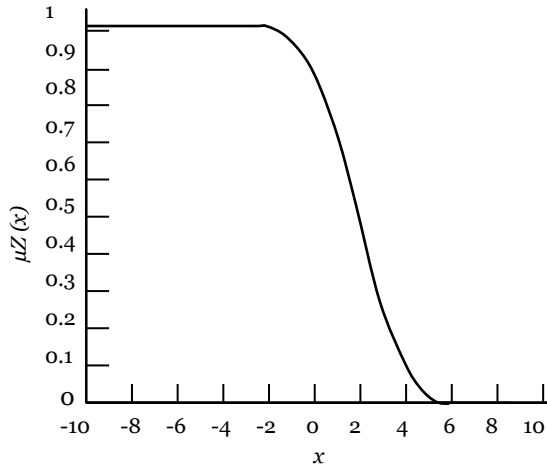


Figura 5.8: Funciones de pertenencia Z .

5.7.8. Función de Pertenencia Pi

La función de pertenencia $\Pi(Pi)$, que se puede denotar por $Pi[a, b, c, d](x)$ o por $\Pi[a, b, c, d](x)$, siendo $a \leq b \leq c \leq d$, es una función de pertenencia asimétrica compuesta por el producto de la función $\mu_S[a, b]$ y la función $\mu_Z[c, d]$. Esta función permite establecer una transición suave desde un grado de pertenencia cero a un grado de pertenencia uno mediante la forma S , y una transición descendiente a pertenencia nula mediante la función Z . Otra forma muy común de definir la función Π es utilizando únicamente dos parámetros, resultando en este caso una función simétrica.

La función de pertenencia Π es continua, define un conjunto difuso normal y convexo. Su soporte es finito siendo $sup(A) = (a, d)$, por lo que la función Π puede emplearse para representar números borrosos. El núcleo de esta función viene dado por $[b, c]$.

En la Figura 5.9 se muestra un ejemplo de función Π , con $a = -6, b = -3$ y $d = 8$.

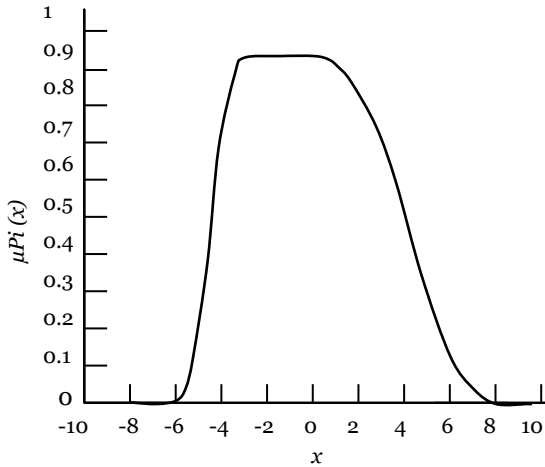


Figura 5.9: Funciones de pertenencia Pi .

5.7.9. Función de Pertenencia Sigmoideal

Una función de pertenencia sigmoideal, $Sigm[\alpha, c](x)$, se define según la expresión 5.13, siendo c el punto para el que $\mu_{Sigm}(c) = 0,5$ y α un parámetro relacionado con la velocidad de transición de la función de pertenencia.

$$\mu_{Sigm}[\alpha, c](x) = \frac{1}{1 + e^{\alpha(c-x)}} \quad (5.13)$$

Las funciones de pertenencia sigmoideales son continuas y definen un conjunto difuso normal y convexo. Su soporte es infinito y no cumplen la condición de límite, por lo que no pueden emplearse para representar números borrosos.

En la Figura 5.10 se representan dos ejemplos de funciones de pertenencia sigmoideales, dadas por los parámetros $Sigm[-2, -4](x)$ y $Sigm[2, 1](x)$. Como puede observarse, un valor positivo de α hace que la función tenga una forma parecida a la función S , mientras que un valor negativo provoca que la función sea similar a una función de pertenencia Z .

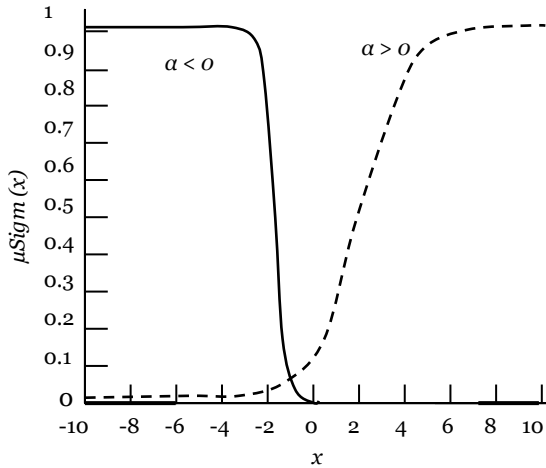


Figura 5.10: Funciones de pertenencia Sigmoideales.

Existen otras funciones de pertenencia basadas en operaciones con funciones sigmoideales. Las más destacadas son la función diferencia de sigmoideales, obtenida mediante la ecuación 5.14, y la función producto de sigmoideales, que se puede calcular a partir de la ecuación 5.15. En ambos casos, ajustando adecuadamente los parámetros c y α de cada una de las sigmoideales, se pueden

obtener funciones tanto normales como no normales, convexas y no convexas, y con soporte finito o funciones de tipo negación de soporte infinito.

$$\mu_{DSigm}[\alpha_1, c_1, \alpha_2, c_2](x) = \mu_{Sigm}[\alpha_1, c_1](x) - \mu_{Sigm}[\alpha_2, c_2](x) \quad (5.14)$$

$$\mu_{DSigm}[\alpha_1, c_1, \alpha_2, c_2](x) = \mu_{Sigm}[\alpha_1, c_1](x) * \mu_{Sigm}[\alpha_2, c_2](x) \quad (5.15)$$

5.7.10. Funciones de Pertenencia *Singleton* o Punto Borroso

Una función de pertenencia *singleton*, o punto borroso, definida sobre x_0 es aquella función de pertenencia cuyo soporte y núcleo es $sup(A) = nuc(A) = x_0$. También se puede utilizar la notación $A = \bar{x}_0$. La función de pertenencia *singleton* es denominada también conjunto difuso escalar.

En la Figura 5.11 se muestra a modo de ejemplo la función de pertenencia *singleton* $A = \bar{0,2}$.

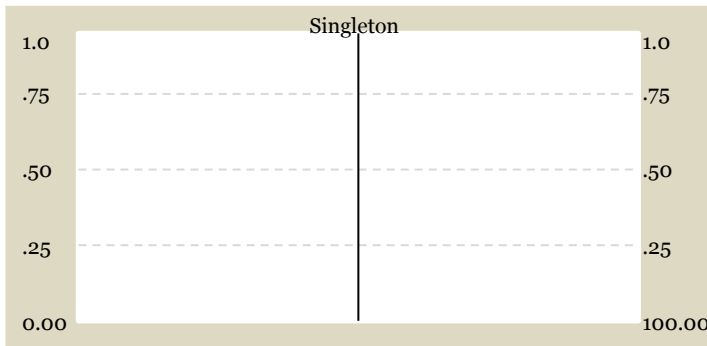


Figura 5.11: Funciones de pertenencia Singleton.

5.8. Funciones de Agregación

El propósito de las funciones de agregación (también llamadas operadores de agregación, ambos términos son intercambiables en la literatura) es el combinar entradas que son típicamente interpretadas como grados de pertenencia en conjuntos difusos, grados de preferencia, fuerza de evidencia, o soporte de

hipótesis, etc.

Por ejemplo, si existen dos o más alternativas, y criterios n para evaluar cada alternativa (o la preferencia de cada alternativa), los resultados (alternativas) se denotan con x_1, x_2, \dots, x_n y y_1, y_2, \dots, y_n para las alternativas x y y , respectivamente. La meta es combinar estos resultados utilizando una función de agregación f , y comparar los valores $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ y $f(y_1, y_2, \dots, y_n)$ para decidir la alternativa ganadora.

Bibliografía

- Barra 2009** Barragan A. "Síntesis de sistemas de control borroso estables por diseño" Universidad de Huelva, Capítulo 2, pp. 13-60, 2009.
- Benito 2010** Benito T., Durán I. "Lógica Borrosa" Universidad Carlos III, 2010.
- Bezdek 1978** Bezdek J., Harris J. "Fuzzy Partitions and Relations: an Axiomatic Basis for Clustering" *Fuzzy Sets and Systems* 1, pp. 111-127, 1978.
- Brown 1977** Brown C. *Analytical Methods for Environmental Assessment and Decision Making* Regional Environmental Systems, Assessment of RANN Projects, Seattle (1977).
- Chalco 2009** Chalco Y., Pedraza J. "An approximation of trapezoidal type fuzzy numbers" *Revista Chilena de Ingeniería* 17, No. 2, pp. 158-165, 2009.
- Díaz 2005** Díaz F., Arsuaga E., Riaño J. "Introducción al Álgebra" *Netbiblo*, Capítulo 1, pp. 1-23, 2005.
- Dubois 1979** Dubois D., Prade H. "Decision Making Under Fuzziness." *Advances in Fuzzy Set Theory and Applications*, Gupta, pp.279-302, 1979.
- Manda 1975** Mandani E., Assilian S. "An Experiment in Linguistic Synthesis With a Fuzzy Logic Controller" *International Journal of Man- Machine Studies* 7:1, pp. 1-13, 1975.
- Okuda 1978** Okuda T., Tanaka H., Asai K. "A Formulation of Fuzzy Decision Problems with Fuzzy Information using Probability Measures of Fuzzy Events" *Information and Control* 38(2), PP.135-147, 1978.
- Pérez 2005** Pérez R. "Procesado y Optimización de Espectros Raman mediante Técnicas de Lógica Difusa: Aplicación a la identificación de Materiales Pictóricos" *Capítulo 2*, pp. 35-60, 2005.
- Pérez 2007** Pérez I. "Lógica difusa para principiantes. Teoría y práctica" *UCAB*, Promera Edición, pp. 15-55, 2007.
- Rodri 2008** Rodríguez J. "lógica Difusa" *Inteligencia Artificial*, No. 2, 2008.
- Rusell 2007** Rusell E., Shi Y. "Computational intelligence". Elseiver, Chapter 7, pp. 269-314, 2007.
- Rutkow 2002** Rutkowska D. "Neuro-fuzzy architectures and hybrid learning" *Physica Verlag*, Germany, 2002.

Valve 1993 Valverde L. "Entrevista a L.A. Zadeh: Del Control Analítico al Control Borroso" *Revista Arbor* CXLVI, pp.573-574, 1993.

Zadeh 1965 Zadeh L. *Fuzzy Sets, Information and Control*, 8(1965) pp.338-353, 1965.

Capítulo 6

Sistema Experto para la Selección de Procesos de Corte No Convencionales

6.1. Introducción

Como se estableció en los capítulos anteriores, una metodología de selección permite hacer frente a un problema exponiendo claramente cuáles son los aspectos que se consideran de relevancia e identificando los procesos factibles de acuerdo a los requerimientos de la pieza, eliminando aquellos que no cumplen éstas restricciones. La elección de un proceso de fabricación, involucra decisiones que ejercen gran influencia sobre la calidad y costes del producto final. Tales medidas afectan el éxito del producto. Uno de los principales factores que influyen en dicha selección depende del conocimiento que se tenga de los diferentes procesos. Por lo regular, la selección de un proceso, sólo se limita a aquellos que son bien conocidos o tradicionalmente utilizados.

En el Capítulo 3 se presentó una recopilación de metodologías para la selección de procesos que mediante el uso de diversos parámetros llegaban al resultado más óptimo de acuerdo a los requerimientos de la pieza. También se hizo énfasis en las soluciones que los centros de investigación ofrecen al apoyarse en personal experto y seguir metodologías previamente establecidas, lo que permite disponer de una oferta tanto a nivel de equipamiento (máquina seleccionada, utillaje básico) como de condiciones de proceso, y con ello tiempos y coste de mecanizado, mucho más ajustado y verificado, evitando posibles

problemas posteriores.

Debido a la complejidad de los diversos procedimientos para la selección de procesos, bien sea matemáticamente o por el conocimiento previo que se tenga de cada proceso, existe aún la necesidad de una herramienta de fácil utilización que pueda emular el comportamiento que tendría un experto al seleccionar un proceso de corte no convencional, una herramienta que permita identificar los atributos y obtener la más apropiada combinación de atributos en conjunción con los requerimientos reales de la aplicación de maquinado.

En el Capítulo 4 se destacaron los sistemas inteligentes como aquellos que están diseñados para adquirir, aplicar y utilizar información, a fin de generar comportamientos asimilables al conocimiento de la inteligencia humana. Se hizo énfasis en el Soft Computing como un área importante de estudio dentro de los sistemas inteligentes, y se presentaron sus componentes principales: la lógica difusa, la computación neuronal, y los algoritmos genéticos.

Más adelante en el Capítulo 5 se hizo evidente el potencial de la lógica difusa, fundamentada en los denominados conjuntos difusos y un sistema de inferencia basado en reglas, que permite la representación y procesamiento de conceptos en términos inexactos, vagos e inciertos, y posibilita el establecimiento de conjuntos con restricciones o límites elásticos.

En este capítulo se presenta el diseño de un sistema para la selección de procesos de corte no convencionales. Este sistema utiliza un modelo de selección basado en técnicas de lógica difusa, generado a partir de reglas y una base de conocimiento obtenida del conocimiento de diversos expertos. A partir de una sencilla captura de los parámetros de una pieza, el sistema ofrece las opciones de corte más apropiadas en base a los requerimientos de una pieza, permitiendo a un usuario **no experto** la selección del proceso más adecuado con énfasis en una prioridad predefinida: acabado, coste o tiempo, de una manera cuantitativamente acertada.

6.2. Resumen del Capítulo

Este capítulo presenta paso a paso el modelo de selección difuso. En la Sección 6.3 se presenta un esquema general del modelo. Enseguida, en la Sección 6.4, se detallan los algoritmos necesarios para la medición de los atributos de cada proceso. La Sección 6.5 presenta la selección de procesos teniendo como prioridad el tiempo, el acabado de la pieza y el coste. Finalmente las conclusiones del capítulo se muestran en 6.6.

6.3. Esquema General del Modelo de Selección

Durante las etapas finales de diseño, cuando casi todos los detalles del proceso, materia y forma se han determinado, sólo es necesario optimizar ciertos detalles. En el caso del corte de chapa metálica el diseño (forma o geometría) es esencialmente fijo, y el material específico ha sido seleccionado, por lo que el problema es principalmente el proceso de corte a utilizar.

Cuando se considera una nueva tarea, el diseñador comienza a cuestionarse diversos factores relacionados con la tarea que desea responder. Por ejemplo: ¿Qué procesos pueden cortar una chapa de acero de 10 *mm* de grosor? o ¿Qué tan rápido puede cortar estas chapas?

La primer pregunta ¿Qué procesos pueden cortar una chapa de acero de 10 *mm* de grosor? conduce a la necesidad de información sobre las capacidades de espesor y material que los procesos pueden cortar. La segunda: ¿Qué tan rápido puede cortar estas chapas? requerirá más información acerca de una serie de parámetros de los posibles procesos que influirán en la velocidad de corte.

En el contexto de selección basada en tareas, esta información se llama “atributos”. El término “atributos” se refiere en un sentido amplio a las características del proceso, material y diseño que se deben combinar de alguna manera para proporcionar la información necesaria para evaluar si los requisitos se pueden cumplir [Sherc 2001].

El sistema de selección de procesos de corte no convencionales propuesto, se puede resumir en el esquema de la Figura 6.1, en la que se combinan los atributos del proceso, el material y el diseño para hacer frente a una exigencia particular (prioridad), produciendo un conjunto de resultados de selección. Existen esencialmente dos formas alternativas en que estos resultados de selección pueden ser utilizados, ya sea para detección, donde las opciones son elimi-

6.3. Esquema General del Modelo de Selección

nadas si no pueden cumplir con los requisitos de la pieza, o para clasificación, donde alguna medida numérica (o cuantitativa) forma la salida, permitiendo ordenar las opciones.

A partir de una sencilla captura de los requerimientos de una pieza: material, espesor y geometría (ángulos y perforaciones), el sistema ofrece las opciones de corte más apropiadas en base a los requerimientos produciendo resultados de detección y de clasificación. Como resultados de clasificación, el sistema producirá en orden descendente una lista de los procesos más adecuados tomando en cuenta la prioridad acabado A , coste C , tiempo T o proceso (donde se evalúan las prioridades A , C y T para cada proceso). Cada proceso i tendrá un valor A_i , C_i y T_i en el intervalo $[0,1]$ siendo el más adecuado aquel que más se acerque a 1. Como resultados de detección, en caso de que un proceso no cumpla con los requerimientos de la pieza, el sistema no elimina el proceso sino que le asigna un valor de 0 en A_i , C_i y T_i .

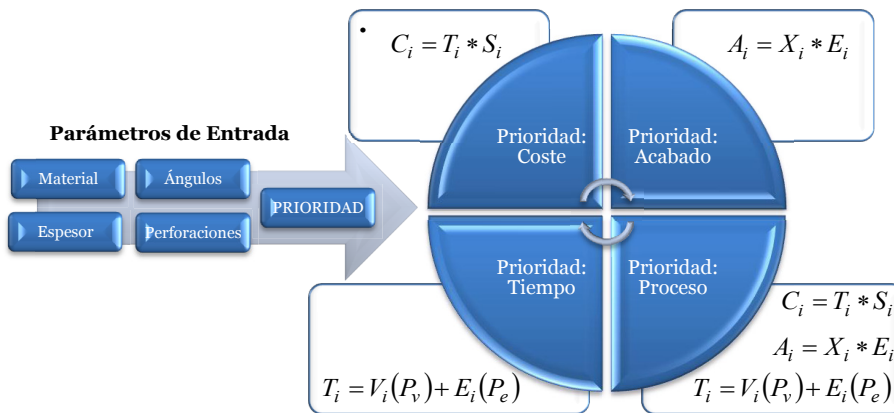


Figura 6.1: Esquema general del modelo de selección. Cada prioridad está representada por una ecuación, donde i es el proceso de corte no convencional actual, C_i es la prioridad de coste, se obtiene del producto de S_i (coste de operación por hora del proceso i) por T_i (tiempo total del proceso i), este último se obtiene a partir de la suma de la velocidad del proceso i , V_i , más la capacidad del proceso i , E_i , ambos ponderados por dos pesos P_v y P_e respectivamente. El acabado A_i se obtiene del producto de la complejidad de la pieza X_i por la capacidad del proceso i .

Para producir un resultado basado en una prioridad, es necesario evaluar primeramente los atributos de cada proceso i . De esta manera si la prioridad es el coste, es necesario conocer el atributo S_i , que es el coste de operación

por hora del proceso i , y el tiempo total que toma un proceso i para cortar una pieza con los requerimientos dados, T_i . Si la prioridad es el tiempo, es necesario combinar el atributo de velocidad, V_i , y la capacidad E_i que tiene un proceso de cortar una relación material-espesor. El acabado como prioridad necesitará involucrar la complejidad de la pieza X_i con la capacidad del proceso.

En las Secciones 6.4 y 6.5 se explica detalladamente el desarrollo de este sistema. En 6.4 se presentan los algoritmos base que permiten la medición de los atributos de cada proceso, y en 6.5 se muestra el proceso de selección basado en prioridades.

6.4. Algoritmos Base para la Medición de Atributos

Antes de poder seleccionar un proceso de corte en base a un criterio predefinido, ya sea coste, acabado, tiempo o por el proceso mismo, es necesaria la medición de los atributos de cada proceso, es decir, una pre-selección que tome en cuenta lo siguiente:

- la capacidad que tiene un proceso para cortar una relación material-espesor,
- la velocidad que puede alcanzar con esa misma relación,
- la complejidad inherente de la pieza a cortar, y
- la tolerancia que tiene un proceso para cortar una pieza.

Los algoritmos base, permiten llevar a cabo esta preselección, cuantitativamente, asignando un valor de capacidad, velocidad, complejidad y tolerancia a cada proceso, a partir de las características de la pieza. Cada algoritmo base dará como respuesta un valor en el intervalo $[0, 1]$ como indicador, o medida de referencia entre los diferentes procesos de sus atributos: capacidad, velocidad, complejidad y tolerancia, en función de los demás procesos. A continuación se describe cada uno de los algoritmos base.

6.4.1. Algoritmo de Capacidad

El espesor del material a cortar en muchas ocasiones impone o restringe la utilización de un determinado proceso. Por ejemplo si se necesita cortar una lámina de hierro de 2 mm de espesor, el oxicorte no sería aceptable si se busca

una calidad mínima de corte, ya que el aporte térmico que este proceso le transfiere a la chapa produce importantes deformaciones, crea tensiones mecánicas y por consiguiente, pérdida de uniformidad. Esta pieza sería ideal cortarla con láser o plasma, pero ¿qué tan ideal sería el láser, o en su caso, el plasma?

El algoritmo de capacidad está diseñado para ser un filtro inicial de eliminación de procesos. Considerando que no todos los procesos pueden cortar todos los materiales, ni todos los procesos tienen la capacidad de cortar todos los espesores, el algoritmo de capacidad da a conocer la capacidad que tiene un proceso i de cortar un material m con un espesor s .

Para la mayoría de las máquinas herramienta, tanto los materiales como los espesores que éstas pueden maquinarse, están previamente definidos mediante tablas de especificación de los mismos fabricantes o expertos en su uso, en las que se hace evidente la capacidad del proceso mediante una relación $m - s$. Partiendo de esta premisa, es posible definir para cada proceso, un conjunto difuso que represente una relación $m - s$.

Como se explicó en el Capítulo 5, un conjunto difuso A se define como una función de pertenencia que enlaza o empareja los elementos de un dominio o universo de discurso U con elementos del intervalo $[0, 1]$ (Ecuación 5.1), cuanto más cerca esté $A(u)$ del valor 1, mayor será la pertenencia del objeto u al conjunto A .

Las funciones de pertenencia indican el grado en que cada elemento de un universo conocido dado, pertenece a dicho conjunto. Por ejemplo, si se tiene una pieza de un material m , con un espesor s , cada proceso de corte i tendrá un grado de pertenencia al conjunto difuso capacidad E_m . Cuanto más cerca esté $E_{m_i}(s)$ del valor 1, mayor será la capacidad del proceso i de cortar la pieza.

En el algoritmo de capacidad, a cada proceso de corte $i \mid i = 1, 2, 3, \dots, n$ le es asignada una función de pertenencia trapezoidal (Figura 6.2) como se describió en la Sección 5.7.2, definiendo los cuatro puntos característicos del trapecio a, b, c y d de la siguiente forma:

- a , es el espesor mínimo que puede cortar el proceso.
- b , es el espesor donde el proceso alcanza el punto óptimo de corte.
- c , es el espesor donde el proceso comienza a perder la capacidad de corte.
- d , es el espesor máximo que puede cortar el proceso.

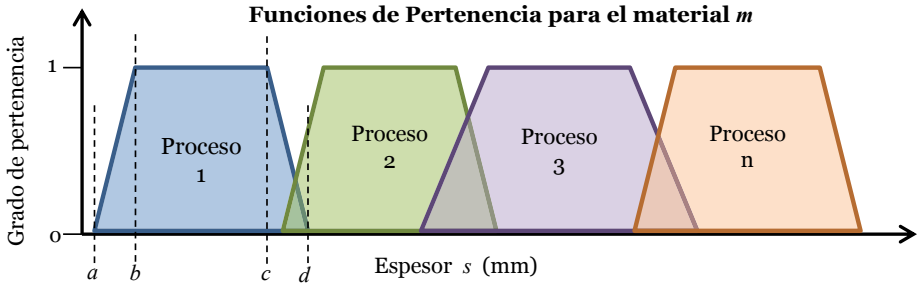


Figura 6.2: Representación gráfica de las funciones de pertenencia trapezoidales para un material m dado.

Los límites entre conjuntos pueden estar solapados, es decir que dada una pieza con una relación $m - s$, es posible que uno o más procesos sean capaces de cortar la pieza con igual, menor o mayor capacidad un proceso que otro.

La principal ventaja de utilizar conjuntos difusos será la eliminación de un umbral de pertenencia (por ejemplo, un valor específico que debe ser alcanzado o superado, para que el proceso en cuestión pueda llamarse incapaz). Si dicho umbral es 20 mm , todas las piezas que midan 20 mm o más no podrán ser cortadas con este proceso. Según esta manera de pensar, una pieza que mida 100 mm será igualmente rechazada que otra que mida 21 mm , ya que ambas han merecido el calificativo de incapaz. Sin embargo, con los conjuntos difusos las transiciones son más suaves, permitiendo así reproducir la realidad mucho más fielmente.

En la Tabla 6.1 se presentan los valores de los puntos a, b, c y d para diversos procesos y materiales. Por ejemplo, si se desea cortar una pieza de aluminio de 80 mm de espesor, haciendo referencia a la Tabla 6.1, se puede observar que el proceso de corte por láser no podrá cortarlo, ya que el espesor máximo que puede cortar es de 12 mm , el proceso de corte por plasma podría cortarlo con dificultad ya que precisamente el espesor máximo que puede cortar es de 80 mm . El proceso de corte por agua sería el más adecuado ya que 80 mm está muy lejos de 140 mm , espesor en el que este proceso comienza a perder la capacidad de corte. Por el contrario, el proceso de Oxicorte no tiene la capacidad de cortar aluminio, debido a esto sus valores en a, b, c y d son cero.

Como resumen, el algoritmo de capacidad se denota con el siguiente pseudo-código:

Tabla 6.1: Valores para funciones de pertenencia trapezoidales relación Material-Espesor.

Acero Medio					Titanio				
Proceso	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	Proceso	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>
Láser	0	0.3	20	25	Láser	0	0.3	5	6
Plasma	0.5	2	75	80	Plasma	0	0	0	0
Agua	0.5	2	110	120	Agua	0.5	2	75	100
Oxicorte	2	3	200	200	Oxicorte	0	0	0	0

Acero Inoxidable					Aluminio				
Proceso	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	Proceso	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>
Láser	0	0.3	14	15	Láser	0	0.3	11	12
Plasma	0.5	2	75	80	Plasma	0.5	2	74	80
Agua	0.5	2	140	150	Agua	0.5	2	140	150
Oxicorte	0	0	0	0	Oxicorte	0	0	0	0

Algoritmo Capacidad (variables de entrada: m, s)

Recuperar valores a, b, c y d para todos los procesos del material m

Evaluar el grado de pertenencia $E_{m_i}(s)$ para cada proceso i

Regresar $E_{m_i}(s)$ para cada proceso i

FinAlgoritmo

$E_{m_i}(s)$ arrojará un valor entre 0 y 1 como resultado de la capacidad que tiene un proceso i para cortar una relación material (m) - espesor (s).

6.4.2. Algoritmo de Velocidad

La velocidad de corte es un valor relacionado con el material que se quiere mecanizar y el espesor de éste. La velocidad a la cual se corta una pieza es un factor importante y puede influir en el volumen de producción y en la calidad del corte. Una velocidad muy baja ocasionará pérdidas de tiempo; una velocidad muy alta puede provocar la pérdida de calidad en la pieza. Por ello, la velocidad y el avance correctos son importantes según el material de la pieza y el tipo de herramienta de corte que se utilice.

El algoritmo de velocidad permite evaluar la velocidad de un proceso en función de la velocidad de los demás procesos para una relación material (m) - espesor (s) dada. El motivo de evaluar la velocidad de un proceso en función de otras es muy simple, no se puede decir que una velocidad es alta o baja si ésta no se compara con la velocidad de otros procesos al cortar una misma pieza.

Para llevar a cabo esta comparación es necesario normalizar las velocidades, es decir, convertir los datos a un nuevo intervalo de definición utilizando la ecuación 6.1 [Yager 1994]:

$$y = \frac{(y_{max} - y_{min}) * (x - x_{min})}{(x_{max} - x_{min}) + y_{min}} \quad (6.1)$$

donde:

y es el resultado de aplicar la normalización

$[y_{min}, y_{max}]$ es el intervalo al que se pretende normalizar

x es el vector a normalizar

x_{max} es el valor máximo del vector a normalizar

x_{min} es el valor mínimo del vector a normalizar

En este caso se desea normalizar en el intervalo $[0,1]$, donde 0 sea la velocidad mínima y 1 la máxima, por lo que x_{min} será 0 en todos los casos y x_{max} será 1. De esta manera la normalización para el intervalo $[0,1]$ queda:

$$y = \frac{x}{x_{max}} \quad (6.2)$$

El algoritmo de velocidad se lleva a cabo de la siguiente manera:

Algoritmo Velocidad (variables de entrada: m, s)

Recuperar para cada proceso i las velocidades $v_{m_i}(s)$

Normalizar las velocidades $v_{m_i}(s)$

Encontrar la velocidad maxima v_{max} de todas las $v_{m_i}(s)$

Dividir cada $v_{m_i}(s)/v_{max}$ obteniendo la velocidad normalizada $V_{m_i}(s)$

Regresar $V_{m_i}(s)$ para cada proceso i

FinAlgoritmo

$V_{m_i}(s)$ arrojará un valor entre 0 y 1 como resultado de la normalización de la velocidad de corte que tiene un proceso i en función de la velocidad de corte de los demás procesos para una relación material (m)-espesor (s).

De la misma forma que con los datos del espesor, la velocidad de corte se obtiene a partir de tablas que se han elaborado por expertos en el trabajo de metales y el uso de diferentes herramientas. En la actualidad gran parte de los fabricantes tiene definidas y publicadas diversas tablas de velocidad de corte (en pies $\frac{feet}{min}$ o en metros por minuto $\frac{m}{min}$), donde se relaciona la velocidad de corte con el material, el espesor y el utillaje propio de cada proceso. Algunos ejemplos se pueden encontrar en [Hyper 2007, KMT 2011, Powell 2004].

A fin de recuperar para cada proceso i las velocidades $v_{m_i}(s)$, es necesario definir para cada material todas las velocidades en un intervalo de espesores definido (p.e. de 0 mm a 200 mm) con incrementos de 1 mm . Los valores de velocidad se toman de las tablas de los diferentes fabricantes. En la Tabla 6.2 se muestra un ejemplo de las velocidades para acero medio con diversos procesos de corte.

Tabla 6.2: Velocidades para acero medio con diversos procesos de corte.

Proceso	Espesor mm / Velocidad $\frac{mm}{min}$					
	2	5	10	15	20	25
Láser	7000	2700	1500	750	500	500
Plasma	9810	3200	1810	3950	2805	2300
Agua	650	228	102	74	46	41
Oxicorte	600	630	560	520	460	420
...

Las velocidades intermedias se obtienen interpolando los valores mediante la ecuación de interpolación lineal 6.3.

$$v_x = vel_1 + (s_x - s_1) \frac{vel_2 - vel_1}{s_2 - s_1} \tag{6.3}$$

donde v_x es la velocidad intermedia que se desea conocer para un espesor s_x . vel_1 y vel_2 son las velocidades conocidas anterior y posterior a v_x , para los espesores s_1 y s_2 respectivamente.

6.4.3. Algoritmo de Complejidad

La geometría de una pieza a cortar y su complejidad, están intrínsecamente relacionadas con la selección del proceso óptimo o los parámetros para su corte. Por ejemplo, las exigencias del corte no serán las mismas para piezas con muchas aristas, muy agudas o puntas muy pronunciadas, que para cortar bridas o simplemente círculos, ya que aquí las exigencias son mínimas. Definir la complejidad de una pieza es un paso esencial en el proceso de selección.

El algoritmo de complejidad permite definir la complejidad de una pieza de una manera sencilla y robusta a partir del número de ángulos y perforaciones que posee la pieza. Durante el desarrollo de esta investigación, se llevó a cabo un estudio que consistió en la entrevista a veinte expertos en corte de chapa metálica. Se presentó una serie de preguntas básicas de opción múltiple que cuestionaban los actores principales que definen la complejidad de una

pieza. Aun cuando un pequeño grupo coincidió en que el material tiene un papel primordial, los resultados mostraron que la complejidad está esencialmente definida a partir de la geometría de la pieza, específicamente por la relación número de ángulos (A) - número de perforaciones (P), la relación $A - P$.

Para definir la complejidad en función de $A - P$, es necesario definir por separado la complejidad en función de A , después en función de P y finalmente ponderar estos valores. La complejidad puede ser etiquetada lingüísticamente como “Sencilla”, “Media” o “Compleja”, para ello se diseñaron tres funciones de pertenencia que definen los conjuntos difusos para el número de ángulos y tres para el número de perforaciones con sus correspondientes etiquetas lingüísticas de la siguiente forma:

- μA_S Función de pertenencia para el conjunto que define una pieza “Sencilla” a partir del número de ángulos.
- μA_M Función de pertenencia para el conjunto que define una pieza “Media” a partir del número de ángulos.
- μA_C Función de pertenencia para el conjunto que define una pieza “Compleja” a partir del número de ángulos.
- μP_S Función de pertenencia para el conjunto que define una pieza “Sencilla” a partir del número de perforaciones.
- μP_M Función de pertenencia para el conjunto que define una pieza “Media” a partir del número de perforaciones.
- μP_C Función de pertenencia para el conjunto que define una pieza “Compleja” a partir del número de perforaciones.

De manera que una pieza “Sencilla” estará definida a partir de la agregación de las funciones μA_S y μP_S como se muestra en la ecuación 6.4:

$$S = \mu A_S (p_a) + \mu P_S (p_p) \quad (6.4)$$

donde p_a y p_p son los pesos para las funciones de pertenencia de ángulos y perforaciones respectivamente. Heurísticamente los mejores resultados se obtienen cuando la combinación de pesos está distribuida en $p_a = 0,4$ y $p_p = 0,6$ debido a que cualquier perforación implica mayor complejidad de una pieza en comparación a otras sin perforaciones.

De la misma forma una pieza “Media” y una pieza “Compleja” se definen con las ecuaciones 6.5 y 6.6.

$$M = \mu A_M (p_a) + \mu P_M (p_p) \quad (6.5)$$

$$C = \mu_{A_C}(p_a) + \mu_{P_C}(p_p) \tag{6.6}$$

Gráficamente se pueden observar estas funciones de pertenencia en las Figuras 6.3 y 6.4. Las funciones $\mu_{A_S}, \mu_{A_M}, \mu_{A_C}, \mu_{P_S}, \mu_{P_M}$ y μ_{P_C} son del tipo trapezoidal con valores a, b, c y d definidos a partir de los resultados del estudio (Tabla 6.3).

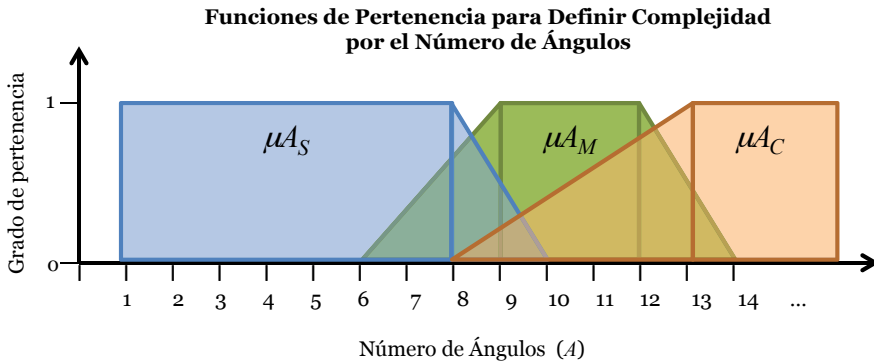


Figura 6.3: Funciones de pertenencia trapezoidales para definir la complejidad en función del número de ángulos.

Tabla 6.3: Valores para funciones de pertenencia trapezoidales para definir complejidad por número de ángulos y perforaciones.

	Ángulos					Perforaciones			
	a	b	c	d		a	b	c	d
μ_{A_S}	1	1	8	10	μ_{P_S}	0	0	0	0
μ_{A_M}	6	9	11	14	μ_{P_M}	1	1	2	3
μ_{A_C}	8	13	>13	>13	μ_{P_C}	1	3	>3	>3

La complejidad total de una pieza como un valor cuantitativo en un rango de 0 a 1 (no solamente como una variable lingüística) puede definirse en una recta numérica como la que se muestra en la Figura 6.5.

Si se definió la pieza como “Sencilla”, es decir que S es mayor que M y que C , entonces la complejidad total c_t está dada por:

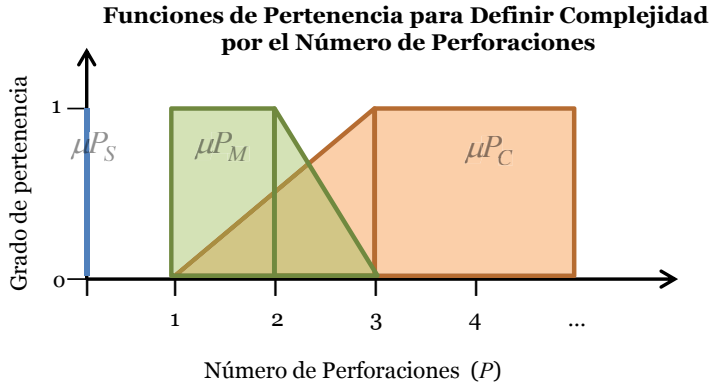


Figura 6.4: Funciones de pertenencia trapezoidales para definir la complejidad en función del número de perforaciones.

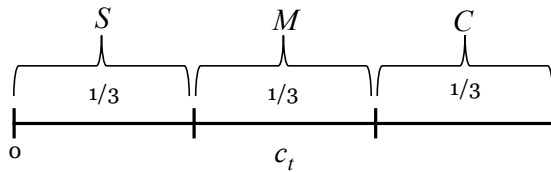


Figura 6.5: Recta numérica para definir la complejidad total de una pieza.

$$c_t = \frac{1}{3}S \tag{6.7}$$

Si la pieza resultó ser “Media” o “Compleja”, la complejidad total estará definida por las ecuaciones 6.8 y 6.9 respectivamente.

$$c_t = \frac{1}{3} + \left(\frac{1}{3}M\right) \tag{6.8}$$

$$c_t = \frac{2}{3} + \left(\frac{1}{3}C\right) \tag{6.9}$$

A modo de resumen, la complejidad de la pieza se evalúa con el siguiente algoritmo:

Algoritmo Complejidad (variables de entrada: A, P)

Evaluar $\mu A_S, \mu A_M, \mu A_C, \mu P_S, \mu P_M$ y μP_C

Calcular complejidad S, M y C

Encontrar el maximo max entre S, M y C

Si $max = S$

$$c_t = \frac{1}{3}S$$

Si $max = M$

$$c_t = \frac{1}{3} + \left(\frac{1}{3}M\right)$$

Sino

$$c_t = \frac{2}{3} + \left(\frac{1}{3}C\right)$$

Regresar c_t

FinAlgoritmo

6.4.4. Algoritmo de Tolerancia

El valor de la tolerancia de corte, no sólo afecta directamente a la calidad de las piezas cortadas sino también a la vida de los útiles [Gazulla 2007]. La tolerancia del corte está altamente ligada a la geometría de la pieza¹, ya que utilizar una tolerancia de corte adecuada traerá ciertos beneficios:

- Menor rebaba y curvatura en los agujeros
- Agujeros más uniformes y cortes más limpios
- Piezas más planas, con menos deformaciones
- Mayor precisión entre agujeros
- Mayor vida del utillaje

El algoritmo de tolerancia especifica que tanta tolerancia tiene un proceso frente a otros, en función de la complejidad de una pieza. Teniendo en cuenta que cada proceso de corte viene definido con una tolerancia mínima (t_{min}) y una tolerancia máxima (t_{max}), este algoritmo evalúa la relación tolerancia-complejidad de cada proceso i midiendo que tanto se acerca a t_{min_i} o a t_{max_i} . Mas allá de evaluar individualmente esta relación, el algoritmo de tolerancia evalúa primeramente la relación de tolerancias entre los diversos procesos y después evalúa la relación tolerancia-complejidad.

¹Más adelante en la Sección 6.5.2, se verá que la tolerancia de corte adecuada también varía con el espesor y con el tipo de material de la chapa, y se involucrará esta relación en un algoritmo.

Partiendo de t_{min} y t_{max} de cada proceso, es necesario normalizar estos valores en conjunto (utilizando la ecuación 6.2), a fin de que las medidas de tolerancia de un proceso i queden en función de los demás procesos. En las columnas 2 y 3 de la Tabla 6.4 se observan las tolerancias t_{min} y t_{max} de cuatro procesos y en las columnas 4 y 5 sus correspondientes tolerancias normalizadas nt_{min} y nt_{max} .

Tabla 6.4: Tolerancias mínimas y máximas para diversos procesos.

Proceso	Tolerancias en mm			
	t_{min}	t_{max}	nt_{min}	nt_{max}
Agua	0.0254	0.127	0.0254/3.175=0.008	0.127/3.175=0.04
Láser	0.0762	0.3809	0.0762/3.175=0.024	0.3809/3.175=0.1199
Plasma	0.254	0.3809	0.254/3.175=0.08	0.3809/3.175=0.1199
Oxicorte	1.5875	3.175	1.5875/3.175=0.5	3.175/3.175=1

Una vez teniendo nt_{min} y nt_{max} , ahora se puede evaluar la relación tolerancia-complejidad X de un proceso i con la ecuación 6.10:

$$X_i = 1 - (((nt_{max_i} - nt_{min_i}) * c_t) + nt_{min_i}) \quad (6.10)$$

donde c_t es la complejidad total de la pieza y se obtiene utilizando el algoritmo de complejidad (Sección 6.4.3). Si se evalúa para cada proceso la parte a la derecha de la ecuación 6.10, el proceso que presente la mejor tolerancia será aquel que más se acerque a 0. Para ser consistentes con todos los algoritmos, donde el mejor resultado es aquel que más se acerca a 1, se invierte el resultado utilizando (1-resultado).

En resumen, el algoritmo de tolerancia se define con el siguiente pseudocódigo:

Algoritmo Tolerancia (variables de entrada: c_t)

Recuperar para cada proceso i las tolerancias mínimas t_{min_i}
y máximas t_{max_i}

Normalizar las tolerancias t_{min_i} y t_{max_i}

Encontrar la tolerancia máxima t_{max}

Dividir todas las tolerancias entre t_{max}

obteniendo las tolerancias normalizadas nt_{min_i} y nt_{max_i}

Evaluar para cada proceso i relación tolerancia-complejidad X_i

Calcular $X_i = 1 - (((nt_{max_i} - nt_{min_i}) * c_t) + nt_{min_i})$

Regresar X_i

FinAlgoritmo

6.5. Selección de Procesos por Prioridad

En las fases iniciales del desarrollo de esta investigación se llevaron a cabo entrevistas a diversos expertos en el área de corte de chapa metálica (Tabla 6.5), más específicamente a especialistas en corte mediante procesos no convencionales (Capítulo 2). Antes de mostrar a los expertos diversos casos hipotéticos en los que era necesario cortar una pieza especificando su geometría, material y espesor, se partía del supuesto que todos los expertos tenían a su disposición todos los procesos. Es decir, todas las máquinas disponibles, instaladas con personal entrenado para su uso, todos los insumos y utillaje, etc., a fin de que la falta de alguno de estos elementos no fuese una restricción para elegir determinado proceso. Enseguida se presentaba una pieza y se hacía la primer pregunta:

¿Qué proceso recomendarías para cortar esta pieza?

La primer respuesta que dieron todos los entrevistados fue: *Depende*. Todos coincidieron en que es necesario conocer de antemano la exigencia particular del cliente respecto a la pieza a cortar, en otras palabras, la prioridad en cuanto al tiempo de corte, el acabado requerido o el coste presupuestado.

Por ejemplo, si se requiere una pieza que no necesite operaciones posteriores para tener un acabado aceptable, la prioridad es el acabado. Cuando se requiere alta productividad, reduciendo los tiempos de entrega de las piezas, la prioridad es el tiempo. Si el cliente desea ver reducidos los costes de fabricación, o cortar una pieza (con un acabado aceptable) al menor costo posible, la prioridad es el coste.

Fue así como se propuso la selección de procesos por prioridad, una manera de emular la forma en que los expertos seleccionan un proceso de corte. En esta sección se detalla la selección por prioridades mediante la combinación de los algoritmos base para la medición de atributos.

Tabla 6.5: Extracto de expertos consultados.

Áreas	Nombre	Empresa	Ubicación
Láser	Luis Costa Herrero	UPC	Barcelona, España
Láser	Kurt Mann	Láser Trumpf	Schramberg, Alemania
Plasma	Dirk Ott	Thermadyne Industries	West Lebanon, EE. UU.
Láser, Plasma, Agua, Oxicorte	Antonio Farese	BLM Group	Cantù, Italia
Láser	Urs Singer	Bistronic Laser	Niederoenz, Suiza
Láser, Plasma, Agua, Oxicorte	Dieter Schöcker	Institut für Umformtechnik	TU Wien, Austria
Láser	David Beggi	RMU	Reggio Emilia, Italia
Agua	Rafael Rodríguez	Flow Ibérica	Madrid, España
Láser, Plasma, Agua	Mathias Liewald	Institut für Umformungstechnik	Stuttgart, Alemania
Plasma, Láser	Girish Kamath	Hypertherm	Roosendaal, Holanda
Plasma, Láser, Agua, Oxicorte	Manuela Zapala	UACJ	Ciudad Juárez, México
Plasma, Oxicorte, Láser	Personal de Servicio	Messer Cutting Systems	Menomonee Falls, WI, EE. UU.
Agua	Personal de Servicio	KMT Waterjet Systems	Madrid, España
Plasma, Oxicorte	Carlos F. Ramírez	UACJ	Ciudad Juárez, México

6.5.1. Prioridad Tiempo

Existen diversos escenarios en los que el tiempo de entrega de una o varias piezas cortadas es crucial, aun a costa de sacrificar el acabado o el coste. En ocasiones existe una alta demanda de piezas o urgencia de producción, más aun, puede darse el caso en que es necesario reemplazar una pieza que ha fallado y es más factible fabricarla que esperar un par de semanas a que llegue el repuesto (por ejemplo del extranjero). Aun cuando no es necesaria una justificación sino la demanda del cliente, conocer los procesos que permiten los mejores tiempos de entrega, ofrece grandes ventajas.

El tiempo de corte está inseparablemente relacionado con la velocidad de corte. Y la velocidad de corte está relacionada con el material y espesor que se desea cortar. La selección de procesos de corte teniendo el tiempo como prioridad, está dada mediante la combinación de los atributos de velocidad y capacidad de corte de cada proceso. En las Secciones 6.4.1 y 6.4.2 se explicó detalladamente cómo medir los atributos velocidad $V_{m_i}(s)$ y capacidad $E_{m_i}(s)$ para cada proceso i con una relación material-espesor ($m-s$) dada. De manera que la prioridad tiempo se puede expresar con la siguiente ecuación:

$$T_i = V_{m_i}(s) (p_v) + E_{m_i}(s) (p_e) \quad (6.11)$$

donde p_v y p_e son los pesos para los atributos velocidad y capacidad respectivamente. Heurísticamente los mejores resultados se obtienen cuando la combinación de pesos está distribuida en $p_v = 0,6$ y $p_e = 0,4$ debido a que pueden existir dos o más procesos con la misma capacidad para cortar una relación $m-s$ y sin embargo cortarán a diferentes velocidades lo que hará la diferencia en el tiempo de corte.

6.5.2. Prioridad Acabado

La calidad de corte requerida puede ayudar a definir la elección del mejor proceso a utilizar aun a expensas de un mayor costo. Todos los procesos tienen una franja óptima de aplicación y ello hace que todos ellos coexistan. Por lo general, cuando se trabaja cerca de los límites de esa franja de aplicación, los resultados no son los mejores en cuanto a calidad de corte y muchas veces se diferencian muy poco entre dos procesos. Por ejemplo, en muchas ocasiones cuesta mucho diferenciar entre un corte láser y un plasma de alta definición cuando la geometría de la pieza no es exigente.

Otro punto sumamente importante que está directamente relacionado con el acabado de la pieza es la precisión requerida. El resultado final no depen-

derá solamente de las tolerancias del proceso en sí mismo, sino que también es dependiente de la calidad y la correcta elección de la máquina portadora, es decir, la máquina que mueve la herramienta de corte.

La tolerancia de corte adecuada varía con el espesor y con el tipo de material de la chapa. Como regla general se puede establecer que a mayor esfuerzo de corte del material y mayor espesor de chapa la tolerancia de corte debe ser mayor [Millán 2006]. Por ejemplo, para chapas de un mismo espesor se necesitará una tolerancia de corte mayor para el inoxidable que para una de acero o de aluminio. Por otro lado una chapa de 6 *mm* de espesor necesitará más tolerancia que una chapa de 1 *mm*.

Teniendo en cuenta las consideraciones anteriores y la opinión de los expertos, se puede decir que el acabado de una pieza es una relación requerimientos- atributos. En cuanto a requerimientos está relacionado con el material, su espesor y la complejidad de la pieza y en los atributos a las capacidades de corte del proceso a partir de una relación material-espesor y a las tolerancias de corte.

El acabado como prioridad en la selección de procesos involucra a dos algoritmos base: el algoritmo de tolerancia y el algoritmo de capacidad. El algoritmo de tolerancia especifica que tanta tolerancia tiene un proceso frente a otros, en función de la complejidad de una pieza y el algoritmo de capacidad da a conocer la capacidad que tiene un proceso i de cortar un material m con un espesor s . De manera que A_i indicará si un proceso dará una mejor ($A_i \rightarrow 1$) o menor ($A_i \rightarrow 0$) calidad de corte en función de la tolerancia-capacidad del proceso. El acabado se define con la ecuación 6.12:

$$A_i = X_i * E_{m_i}(s) \tag{6.12}$$

donde X_i es la tolerancia del proceso i en función de la complejidad de una pieza y se define con la ecuación 6.10, $E_{m_i}(s)$ es la capacidad que tiene un proceso i para cortar una relación material (m) - espesor (s) y está definida en la sección 6.4.1.

6.5.3. Prioridad Coste

El coste del corte mediante un proceso va en función de la inversión inicial, el coste operativo, el mantenimiento necesario, el equipamiento de la máquina en relación a las cantidades de corte habituales, entre otros. Como usuario/cliente el coste se reduce a una simple comparación de coste de corte por hora, cantidad de piezas o coste por m^2 de corte. Obviamente estos precios estarán en

función de los costes operativos de quien da el servicio.

El coste como prioridad en la selección de procesos involucra el tiempo de corte y el coste de operación por hora de corte para cada proceso. En la Tabla 6.6 se observan ejemplos de coste de operación por hora S_i para diversos procesos.

Tabla 6.6: Coste de operación por hora para diversos procesos.

Proceso	S_i , coste de operación por hora en euros
Láser	46.83 ¹
Plasma	28.67 ¹
Agua	17.82 ²
Oxicorte	6.26 ¹

¹ Obtenido de [Hyper 2011] en base a consumibles, electricidad, gas, y recambios.

² Obtenido de [Water 2011] cálculo en base al abrasivo, electricidad, agua y recambios.

De esta manera la selección de procesos con el coste como prioridad está dada por:

$$C_i = T_i * S_i \tag{6.13}$$

donde el tiempo de operación T_i se obtiene siguiendo la ecuación 6.11 y S_i es el coste de operación por hora en euros para cada proceso i .

6.5.4. Prioridad Proceso

Cuando solamente se desea conocer los atributos de un proceso frente a otros dados ciertos requerimientos, la prioridad proceso dará a conocer un valor en T_i , A_i y C_i para cada proceso i , incluyendo información específica de cada proceso: componentes básicos, principios de operación, velocidades de corte, consideraciones generales, ventajas e inconvenientes, entre otros.

6.6. Conclusiones del Capítulo

En este capítulo se presentó el diseño de un sistema para la selección de procesos de corte no convencionales como respuesta a la necesidad de una herramienta de fácil utilización que pueda emular el comportamiento que tendría un experto al seleccionar un proceso de corte no convencional. Este sistema identifica los atributos de los diferentes procesos mediante el uso de técnicas de lógica difusa y permite obtener la más apropiada combinación de atributos en

conjunción con los requerimientos reales de la pieza a cortar.

En el siguiente capítulo se demostrará la eficiencia del sistema mediante la realización de diversos experimentos comparativos. Se podrá verificar que la selección del proceso más adecuado con énfasis en una prioridad predefinida: acabado, coste o tiempo, es cuantitativamente comparable a la selección realizada por diversos expertos.

Bibliografía

- Gazulla 2007** Gazulla X. “Tolerancias de corte,” En Bits of ASCAMM, En línea <http://ascammtraining.blogspot.com/2007/10/tolerancias-de-corte.html>, (Recuperado el 30 de Junio de 2011).
- Hyper 2007** Hypertherm. “HyPerformance®Plasma HPR130™,” Copyright 11/07 Hypertherm, Inc. Revision 3 870290, 2007.
- Hyper 2011** Hypertherm.
- KMT 2011** KMT Waterjet Systems Inc. “Abrasive Waterjet Orifice Size/Cutting Speeds,” En línea www.kmtwaterjet.com (Recuperado el 24 de junio de 2011).
- Millán 2006** Millán S. “Procedimientos de Mecanizado,” Madrid: Editorial Paraninfo, ISBN 84-9732-428-5, 2006.
- Powell 2004** Powell J. y Kaplan A. “Laser Cutting: From First Principles to the State of the Art,” En Proceedings of the 1st Pacific International Conference on Application of Lasers and Optics, 2004.
- Sherc 2001** Shercliff H. y Lovatt A. “Selection of Manufacturing Processes in Design and the Role of Process Modelling,” Progress in Material Science, 46, pp. 429-459, 2001.
- Yager 1994** Yager R. y Filev D. “Essentials of Fuzzy Modeling and Control,” John Wiley & Sons, 1994.

Capítulo 7

Experimentos y Resultados

7.1. Introducción

En este capítulo se presentan algunos resultados de los experimentos realizados para evaluar el desempeño y precisión del sistema propuesto. El objetivo es mostrar que la selección resultante del análisis efectuado por diversos expertos y el realizado por el sistema es cuantitativamente comparable, evidenciando el potencial de este sistema como herramienta básica durante la toma de decisión en la selección de procesos de corte no convencionales.

Para realizar dicha comprobación, se desarrolló una herramienta basada en el sistema presentado en el Capítulo 6, el software “*Metal Cutting Process Selector V1.1©*” o MCPS (Apéndice A). Se utilizaron como referencia piezas metálicas de Aluminio, Acero, Titanio y Acero Inoxidable, debido a que son los materiales más comunes en aplicaciones de corte. Las piezas fueron seleccionadas a partir de ejemplos reales, piezas que han sido previamente analizadas por expertos y fabricadas con un proceso de corte no convencional: corte por láser, corte por arco de plasma, oxicorte o corte por chorro de agua. Cada una de las piezas, posee una calidad y tiempo de corte, son de diferentes dimensiones y diversos grados de complejidad. Los espesores van desde los 2 *mm* hasta los 100 *mm* en algunos casos.

Los experimentos se han realizado considerando tres enfoques distintos. El primero de ellos es meramente comparativo: la selección del experto vs. la selección del sistema. Esto se realiza solamente para comprobar que el sistema elige, al igual que un experto, el proceso de corte más apropiado. Se analizan los parámetros de piezas elaboradas con un proceso de corte definido y se

comprueba la viabilidad de selección. En el segundo enfoque se analizan cuantitativamente las capacidades de los diversos procesos al cortar una pieza en base a una prioridad, y posteriormente se comparan éstos resultados con los resultados arrojados por el sistema. El último enfoque consiste en la selección del proceso de corte en base a una serie de requerimientos y necesidades de la pieza, se introducen los parámetros de entrada y el sistema arroja los resultados de selección, éstos se comparan con las diversas opiniones de un grupo de expertos.

7.2. Resumen del Capítulo

La Sección 7.3 muestra una comparativa experto-sistema mediante diversos ejemplos de aplicación. En la Sección 7.4 se comparan los datos cuantitativos de las capacidades de diversos procesos al cortar una pieza en base a una prioridad, contra los resultados arrojados por el sistema. En 7.5 se presenta un tercer enfoque para los experimentos, se comparan las diversas opiniones de un grupo de expertos con los resultados de selección del sistema. Finalmente las conclusiones del capítulo se presentan en la Sección 7.6.

7.3. Primer Enfoque: Selección Experto Vs. Sistema

Se eligieron piezas metálicas manufacturadas según el criterio, experiencia o conocimiento de diversos expertos. Una vez fabricada la pieza, se introdujeron al sistema los valores necesarios para la selección. El propósito es confirmar que el sistema seleccionará al igual que un experto (habiendo realizado un análisis previo) el proceso de corte más apropiado.

7.3.1. Ejemplo de Aplicación

La pieza mostrada en las Figuras 7.1 y 7.2, forma parte de un diseño integral elaborado en el Centro de Diseño de Equipos Industriales (CDEI) de la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC) como parte de un proyecto para la empresa Girbau de España, empresa dedicada a la creación de sistemas de lavado industrial de textiles. Los requerimientos de diseño para esta pieza se muestran en la Tabla 7.1:

Tabla 7.1: Requerimientos de Diseño Girbau.

Material	Espesor	# de piezas	Prioridad
Aluminio 7075/7049	8 mm	8	Acabado



Figura 7.1: Mecanismo Fabricado para tren de Lavado. Cortesía de Girbau.

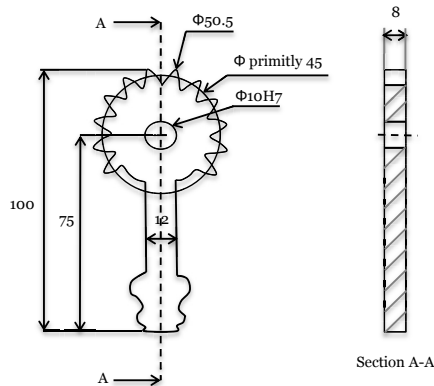


Figura 7.2: Dimensiones generales de la pieza de lavado.

Como primer paso para llevar a cabo la comparación, el usuario debe introducir los requerimientos de la pieza (Figura 7.3): material, espesor, número de ángulos y número de perforaciones. El tipo de material se selecciona de un listado, éste listado de materiales fue seleccionado del nivel 1 de la base de datos

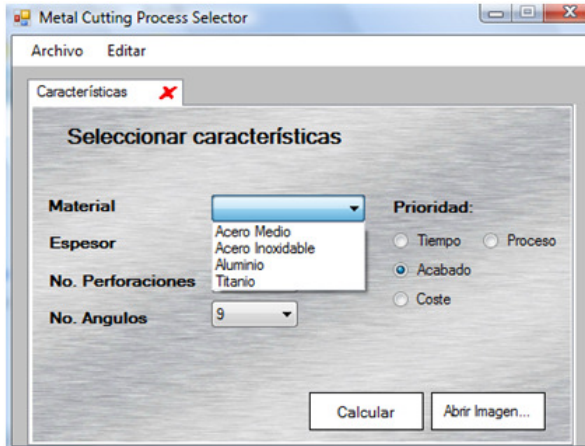


Figura 7.3: Pantalla principal para introducir parámetros de corte.

de materiales de CES Edupack©[CES 2005]. Por último se elige una prioridad para el diseño, la cual puede ser seleccionada entre acabado, costo o tiempo.

Para facilitar la captura de información, el sistema permite visualizar una imagen de la pieza (Figura 7.4), esta es llamada desde el programa y aceptará cualquier tipo de extensión ya que sólo se muestra como imagen y no se permite alterarla durante el proceso.

Una vez introducidos los requerimientos de la pieza al sistema, se obtienen como resultado tres gráficos (verificar explicación en el anexo A.8.1) que representan las tres prioridades que se pueden tomar en consideración. Primeramente se muestra el gráfico con la prioridad elegida por el usuario (Figura 7.5), que en este caso es el acabado. Enseguida se muestran los gráficos restantes con las prioridades de tiempo y coste (Figuras 7.6 y 7.7). Las barras indican la capacidad que tiene cada proceso para cortar la pieza en relación a los parámetros y a la prioridad elegida. Como se explicó en el Capítulo 6, el acabado se define con la ecuación 6.12, y mientras el valor de $A_i \rightarrow 1$ el proceso tendrá mejor acabado.

Como resultado de este experimento, el sistema indica en la Figura 7.5, que de la misma forma que el experto ha seleccionado en base a su experiencia el corte por agua cuando se tiene como prioridad el acabado, asimismo el sistema muestra que la mejor opción para el corte en este diseño, es el corte por agua con un valor de 0,96, superior a los resultados mostrados por el corte por láser,

7.3. Primer Enfoque: Selección Experto Vs. Sistema

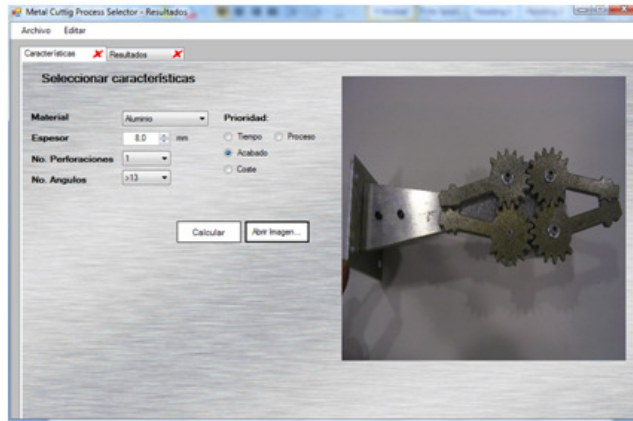


Figura 7.4: Pantalla principal del software mostrando la imagen de una pieza.

plasma y oxicorte, siendo los más cercanos el láser y el plasma con un valor de 0,88.

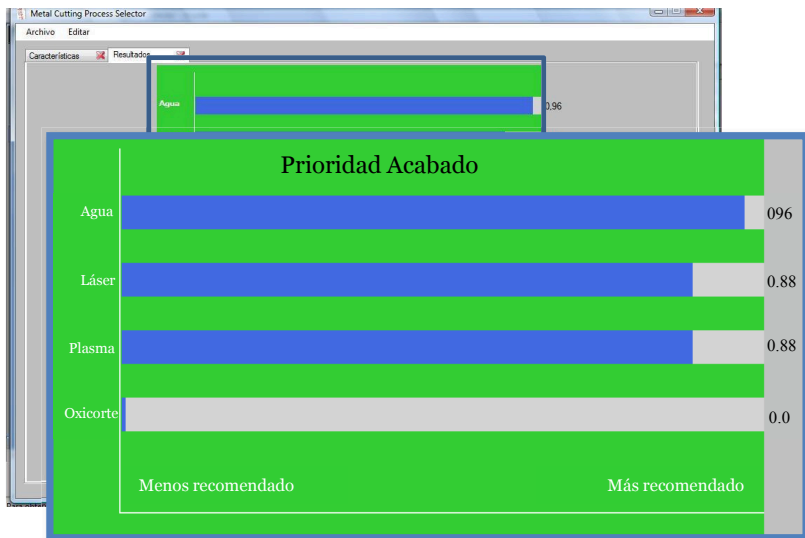


Figura 7.5: Resultados de selección de procesos para la pieza Girbau con prioridad en el acabado.

7.3.2. Modificando la Prioridad

Si suponemos que la prioridad inicial fuera el tiempo, habría que evaluar en base a las velocidades y las capacidades de los procesos utilizando la ecuación 6.11. El resultado final cambia respecto a la prioridad acabado, en este caso en la Figura 7.6 se muestra cómo el proceso de corte por agua deja de ser la opción principal y el proceso de plasma se convierte en la opción más rápida, dejando al láser, al agua y al oxicorte como opciones secundarias en base al tiempo de corte respectivamente.



Figura 7.6: Resultados de selección de procesos con prioridad en el tiempo.

De igual forma el comportamiento de los resultados es diferente en el caso de utilizar como prioridad el coste, principalmente debido a las características propias de cada proceso para su funcionamiento. Los resultados de selección se muestran en la Figura 7.7, donde se observa que el plasma es la opción menos costosa con un grado de pertenencia de 0,3877, seguido por el agua con un grado de pertenencia de 0,3213, dejando al corte por láser y al oxicorte como opciones no recomendadas para la fabricación de la pieza bajo esta prioridad.

Si en lugar de seleccionar una prioridad, se desea conocer el comportamiento de los diferentes procesos (ver anexo A.8.2), la opción “proceso” mostrará las capacidades de cada proceso para cortar la pieza con los requerimientos dados (Figura 7.8). De esta manera se podrán comparar todos los procesos. Al analizar los resultados de la Figura 7.8, se puede recomendar al usuario el uso del

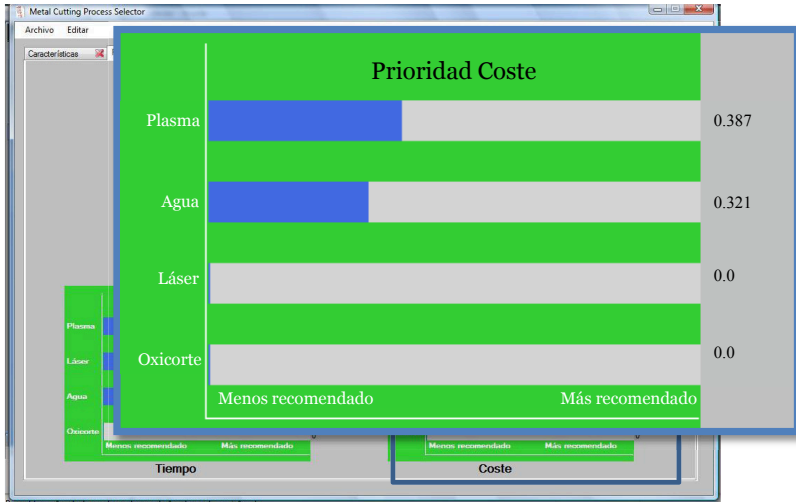


Figura 7.7: Grados de pertenencia de acuerdo al requerimiento de coste.

proceso de corte por plasma, debido a las características de tiempo, es el más rápido, también es el más barato, y en acabado es una muy buena opción con un grado de pertenencia en calidad igual al del corte por láser de acuerdo a los requerimientos de la pieza.

7.3.3. Otros Experimentos

En la Tabla 7.2 se muestran diez experimentos realizados siguiendo el primer enfoque [ACM 2009, Bistro 2010, Kern 2011, WNN 2009].

- El experimento 1 se realizó bajo la prioridad de tiempo, coincidiendo el resultado obtenido por el sistema con la elección realizada por el experto.
- El segundo experimento es de una pieza de acero de 51 mm con una sola perforación y 6 ángulos, el sistema indica que la mejor selección es el plasma bajo la prioridad de tiempo con un grado de pertenencia de 1 y como segunda opción el oxicorte con un grado de pertenencia de 0,6389.
- El tercer experimento es una pieza muy compleja por el número de ángulos que tiene, aunque solamente presente una sola perforación. El material es Aluminio de 30 mm de espesor. La pieza fue analizada con la prioridad de acabado la cual da un valor para el corte por agua de 0,9877 y para el corte por plasma de 0,9146.

7.3. Primer Enfoque: Selección Experto Vs. Sistema













Figura 7.8: Resultados de selección basados en procesos.

- La cuarta pieza es una placa de aluminio de 2 mm de espesor, cortada con la prioridad de acabado, seleccionando al igual que el experto el corte por láser con un valor de 0,9312 y 0,9119 para el corte por agua.
- El quinto experimento es una pieza de Acero de 60 mm de espesor cortada con agua, los resultados muestran que el proceso más conveniente es el corte por agua con una pertenencia de 0,9902 y en segundo lugar el corte por plasma con un valor de 0,9178 de pertenencia. La prioridad fue el acabado.
- El sexto experimento es de acero inoxidable de 2 mm de espesor, cortada con plasma. Los resultados indican que el corte por láser ofrece una mejor solución para esta pieza en particular con un grado de pertenencia de 1, mientras que el corte por plasma también es una buena elección con un grado de pertenencia de 0,7060.
- El séptimo experimento muestra a una pieza de aluminio de 6 mm de espesor, la cual fue cortada por agua, los resultados indican que el sistema

7.3. Primer Enfoque: Selección Experto Vs. Sistema

y el experto coinciden bajo la prioridad de acabado, dando un grado de pertenencia para este corte de 0,9877 para el agua y 0,9632 para el láser.

Tabla 7.2: Experimentos utilizando el primer enfoque.

Pieza	Material	Espesor en mm	Calidad	Cortado con	Tiempo en min	Sistema
	Acero Inox	15	Alta	Agua	6:31	Agua 0.9749 Plasma 0.8986
	Acero Medio	51	Media	Plasma	1:30	Plasma 1 Oxicorte 0.6389
	Aluminio	30	Alta	Agua	47:15	Agua 0.9877 Plasma 0.9146
	Aluminio	2	Alta	Láser	0:23	Láser 0.9312 Agua 0.9119
	Acero	60	Alta	Agua	77:00	Agua 0.9902 Plasma 0.9178
	Acero Inox	2	Media	Plasma	0:43	Plasma 0.7060 Láser 1
	Aluminio	6	Alta	Agua	3:16	Agua 0.9877 Láser 0.9632
	Aluminio	12	Baja	Láser	1:35	Láser 0.1847 Plasma 1
	Acero Medio	100	Baja	Oxicorte	3:15	Oxicorte 1 Agua 0.4168
	Acero Medio	19	Baja	Láser	2:05	Láser 0.9708 Agua 0.9902

- En el experimento 8, la pieza está fabricada en Aluminio de 12 mm de espesor, el proceso utilizado fue el corte por láser, sin embargo como se puede observar en la figura la calidad no es muy buena. Los grados de pertenencia en base al tiempo son de 0,1847 para el Láser, y 1 para el

plasma. Estos resultados indican que el plasma es mejor proceso que el utilizado para el corte de esta pieza.

- El experimento 9 es de una pieza de acero de 100 *mm* de espesor, el tiempo es la prioridad para cortar una placa de este espesor. Los resultados muestran cómo el oxicorte es la mejor opción con un grado de pertenencia de 1 mientras que el corte por agua tiene un grado de pertenencia de 0,4168.
- Por último esta pieza es de acero de 19 *mm*, muestra en su interior 3 perforaciones y ha sido previamente cortada con láser. Los resultados indican que el láser es la opción posterior al corte por agua con un grado de pertenencia de 0,9632 mientras que este último tiene un grado de pertenencia de 0,9877.

7.4. Segundo Enfoque: Comparación Entre Procesos

Usualmente los fabricantes de equipo de corte muestran las principales ventajas de cada proceso, comparando sus equipos de corte con otros equipos que utilizan tecnologías diferentes. En esta sección, se analiza un caso práctico donde el experto previamente compara respecto al tiempo tres procesos de corte. Se introducen los requerimientos de la pieza poniendo el tiempo como prioridad y posteriormente se realiza una comparación de los resultados del sistema MCPS contra los obtenidos por el experto con el propósito de verificar si existe una relación directa.

El objetivo de este experimento es identificar la capacidad de los diversos procesos en relación al tiempo, a fin de que el usuario compruebe cuantitativamente que el proceso elegido por el experto y la opción resultante del sistema es la opción más acertada, y que esta comprobación le sea de ayuda en la toma de decisión.

7.4.1. Ejemplo de Aplicación

La información mostrada en la Tabla 7.3 es de una pieza que ha sido fabricada mediante tres procesos de corte distintos por la compañía Messer [Messer 2011], empresa dedicada al corte de chapa.

De acuerdo a los resultados obtenidos por los procesos de corte mostrados en la Tabla 7.4, se puede observar que el proceso de plasma es el más adecuado

7.4. Segundo Enfoque: Comparación Entre Procesos

para este material y espesor, con un tiempo total para el corte de la pieza de 43 segundos, seguido por el láser con un total de 57 segundos y por último el oxicorte con un total de 3:52 minutos.

Tabla 7.3: Requerimientos de la pieza Messer.

Material	Acero medio
Espesor	12 mm
Ángulos	6
Perforaciones	2

Tabla 7.4: Tiempos de corte de diversos procesos para la pieza Messer.

Proceso	Tiempo en min
Oxicorte	3:52
Plasma	0:43
Láser	0:57

Para la comprobación, se introdujeron los requerimientos de la pieza tal y como se muestran en la Tabla 7.3, seleccionando el tiempo como prioridad. Los resultados del sistema MCPS se observan en la Figura 7.9:

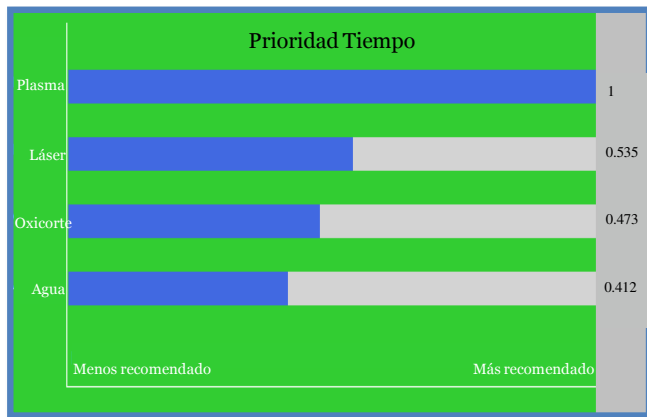


Figura 7.9: Resultados de selección para la pieza Messer con tiempo como prioridad

De acuerdo a los resultados del sistema mostrados en la Figura 7.9, se comprueba que el corte por plasma es la opción más adecuada para el corte cuando se tiene el tiempo como prioridad, con un grado de pertenencia igual a 1. En el mismo orden que el experto, el sistema seleccionó como segunda y tercera opción los procesos de corte por láser y oxicorte.

La Figura 7.10 muestra los resultados de selección de acuerdo a la prioridad de acabado, en éstos se puede observar la proximidad a la unidad que poseen el

7.4. Segundo Enfoque: Comparación Entre Procesos

corte por agua, láser y plasma, lo que indica que cualquiera de estos procesos son una opción viable para el corte bajo esta prioridad.

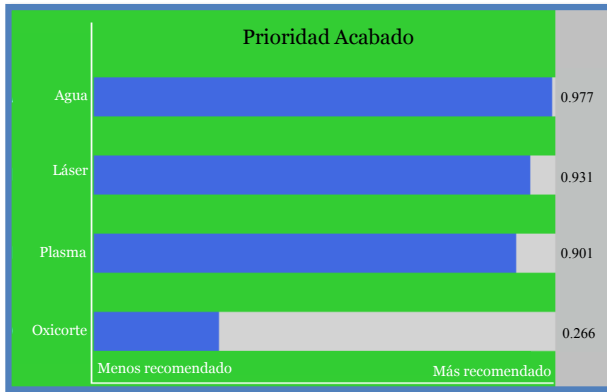


Figura 7.10: Resultados de selección para la pieza Messer con prioridad acabado.

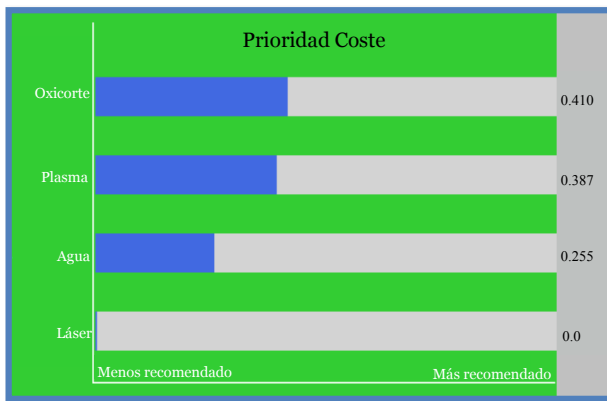


Figura 7.11: Resultados de selección para la pieza Messer con prioridad coste.

Analizando el mismo caso de estudio, eligiendo el coste como prioridad, se puede observar en la Figura 7.11 que el oxicorte es la mejor opción con un grado de pertenencia de 0,4103, mientras que el plasma posee un grado de pertenencia de 0,3877 seguido por el agua con 0,2554 y por último el láser que tiene un grado de pertenencia de cero, esto debido a que los costes de corte de

la pieza se elevan por los insumos que requiere el proceso, convirtiendo al láser en una mala opción respecto a los demás procesos.

7.5. Tercer Enfoque: Análisis de Requerimientos

En este enfoque, se conocen los requerimientos de la pieza, tales como espesor, material y geometría. Dados los requerimientos se desea conocer cuál es el proceso más conveniente. De manera general, las piezas son cortadas con aquellos procesos que previamente han sido utilizados en piezas con características similares, es decir procesos conocidos. Sin embargo, cuando el proceso usual no tiene la capacidad de corte, o cuando no existen referentes en cuanto a forma o no se tiene la experiencia adecuada con diferentes procesos, una herramienta como el sistema MCPS es un recurso valioso en la toma de decisiones.

A continuación se presenta un caso que ha sido propuesto a un grupo de expertos por la empresa *Titan Engineering* de Singapur, dedicada a la distribución de productos de Titanio, utilizando la plataforma *Practical Machinist* [PraMac 2009], foro dedicado a buscar soluciones para procesos de manufactura.

7.5.1. Ejemplo de Aplicación

Se desean cortar 100 piezas como las mostradas en la Figura 7.12, elaboradas con Titanio de Grado 2, la tolerancia permitida es de $\pm 2\%$. Las piezas contienen tres y cuatro perforaciones de 6 mm cada una.

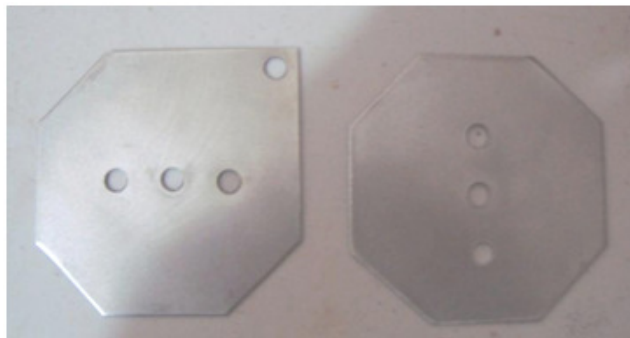


Figura 7.12: Pieza Hexagonal de Titanio de 2 mm de espesor.

7.5. Tercer Enfoque: Análisis de Requerimientos

Se presentan diversas soluciones para el corte de la pieza planteada, de acuerdo al conocimiento previo del grupo de expertos. Las soluciones se indican en la Tabla 7.5:

Tabla 7.5: Sugerencias de expertos para aplicación de Titanio.

Experto	Orígen	Selección
MetaRinka	Ann Arbor, Michigan, USA.	Agua
Mark Leigh	Merced, California, USA.	Láser
Jim Colt	Hanover, New Hampshire, USA.	Plasma
Jhon CA	California, USA.	Agua
David Cross	Abbotsford, BC, Canada.	Plasma
Metal Tech	Minnesota, USA.	Agua
Slim L	Washington, USA.	Láser

De acuerdo a la tabla anterior, existe una diversificación de opiniones entre los expertos, los procesos sugeridos son el corte por agua (tres expertos), el corte por láser (dos expertos) y el corte con plasma (dos expertos). Estos resultados demuestran que las opiniones se realizan en base al conocimiento o experiencia que se ha tenido en el corte de Titanio y no bajo un patrón obtenido mediante una metodología definida.

Se realizó la selección utilizando el sistema MCPS, se introdujeron los requerimientos de la pieza, y dado que la empresa *Titan Engineering* no especifica ninguna prioridad, se calcula seleccionando proceso como prioridad (Figura 7.13).

Figura 7.13: Información entrante para pieza de Titanio de 2 mm.

Debido a que no se cuenta con un proceso referente, o una solución previa al problema, en este análisis al seleccionar la opción por proceso, como resultado se muestran cada uno de los diversos procesos por separado con las tres prioridades indicadas mediante gráficos como los que se muestran en la Figura 7.14, en este caso se muestran los resultados para el proceso de corte por láser.

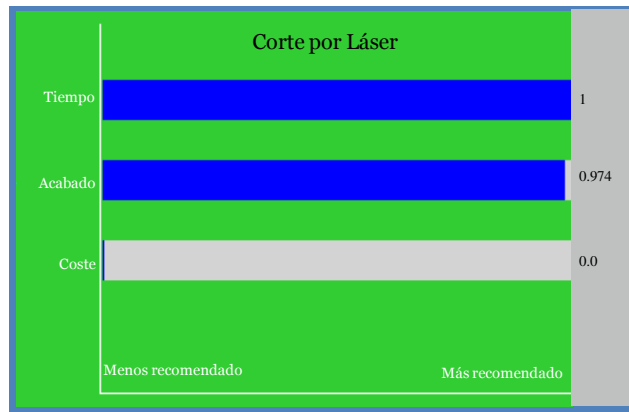


Figura 7.14: Resultados del análisis por proceso para el corte por láser.

En la gráfica anterior, se puede apreciar cómo los resultados del sistema para el corte por láser favorecen a la prioridad de tiempo, también se observa que es una muy buena opción si se toma como referencia el acabado, como se muestra en la gráfica. Sin embargo, la prioridad de coste no es recomendable debido a las características de este proceso.

En los gráficos de la Figura 7.15 se puede observar que los resultados para el corte por chorro de agua respecto al tiempo, son inferiores a los del corte por láser, sin embargo, el acabado es aún mejor que en éste último. En cuanto al coste de la pieza, resultaría más barato fabricar esta pieza con el chorro de agua que con el láser.

Una vez analizados los procesos, si el funcionamiento del mismo es desconocido, es posible acceder a una base de datos de cada proceso donde se muestran las especificaciones técnicas de cada uno de ellos (Figura 7.16). Esta información está disponible como parte de los resultados dentro del mismo programa, pulsando un botón (ver Anexo A.3).

7.5. Tercer Enfoque: Análisis de Requerimientos

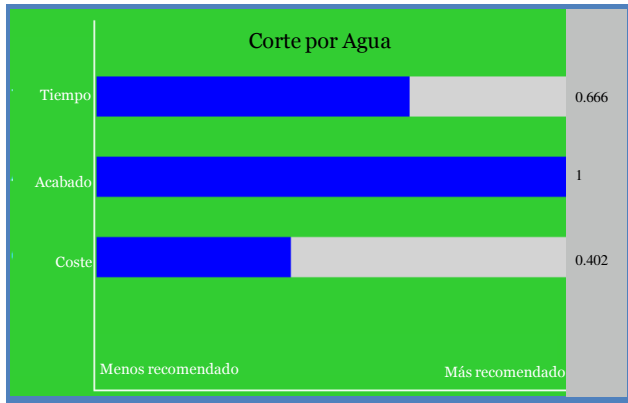


Figura 7.15: Resultados del análisis por proceso para el corte por chorro de agua.

Corte por Láser

El corte por láser es un proceso inducido térmicamente, en el cual la energía de un haz de luz focalizado, es absorbida por un material que se vaporiza formando así el corte. Los factores que determinan la posible aplicación del láser en el corte de materiales son en su mayoría propiedades ópticas, térmicas, eléctricas y mecánicas del propio material. La absorción de la radiación incidente es uno de los más importantes. No solo depende de las características del material, sino también de la longitud de onda de la radiación.

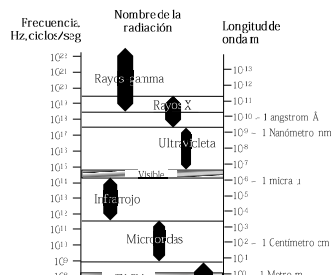


Figura 7.16: Ejemplo de información técnica del proceso de corte por láser.

Asimismo, es posible conocer el funcionamiento del proceso mediante un video de soporte que se encuentra en la misma base de datos del programa. Un ejemplo de ello se muestra en la Figura 7.17

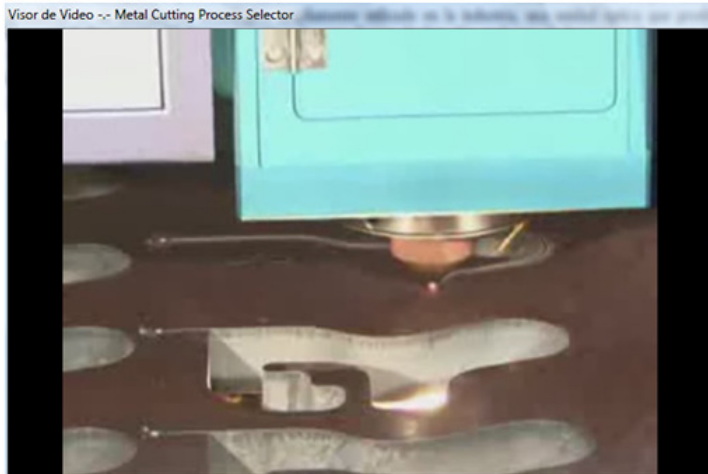


Figura 7.17: Video de Soporte para la MSPC.

7.6. Conclusiones del Capítulo

La herramienta de selección de procesos de corte, es un instrumento que facilita la toma de decisiones durante la elección de un proceso de corte no convencional. A partir de la metodología propuesta en el Capítulo 6, se ha desarrollado un sistema de software, el cual permite a un usuario no experto conocer de manera rápida y sin complicaciones de uso, las opciones de corte más apropiadas.

El sistema presentado utiliza solamente los principales procesos de corte no convencionales para el corte de chapa metálica: corte por láser, agua, plasma y oxicorte. La interface es totalmente amigable, de fácil funcionamiento y comprensión por lo que puede ser utilizado por cualquier usuario con conocimientos básicos de procesos.

De acuerdo a la información proporcionada por el usuario, es decir, los requerimientos de la pieza a cortar, el sistema presenta de forma ordenada los procesos de corte más convenientes. Es posible llegar a la correcta selección de un proceso de corte de chapa metálica con un alto grado de confiabilidad mediante esta herramienta basada en técnicas de lógica difusa, sin la necesidad de ser un experto en procesos de manufactura.

7.6. Conclusiones del Capítulo

De acuerdo a los experimentos realizados en este capítulo, se pudo comprobar que el sistema MSPC, al igual que un experto, es capaz de presentar en el correcto orden los diferentes procesos de corte de acuerdo a las prioridades elegidas.

Bibliografía

- ACM 2009** Automated Cutting Machinery. Disponible En Línea www.automated-cutting-machinery.com, 2009.
- Bystro 2010** Bystronic Water Jet Cutting. “An Alternative Production Technology,” pp 1-12 , 2010.
- CES 2005** CES Edupack Granta Design Versión 2005, En Línea www.grantadesign.com, 2005.
- Kern 2011** Kern Lasers. Disponible En Línea www.youtube.com/user/kernlasers/?blend=24/&ob=5/#p/u/6/A9Db0eqxKV0, 2011.
- Messer 2011** Messer Cutting Systems, Disponible En Línea www.messer-cw.de/schneidesysteme/_es/downloads/videos_animationen/video.php, Recuperado el 12 de Julio de 2011.
- PraMac 2009** Practical Machinist, Disponible En Línea www.practicalmachinist.com/vb/fabrication-cnc-laser-waterjet-plasma-welding-fab/waterjet-plasma-laser-process-195106/, 2009.
- WNN 2009** World News Network. Disponible En Línea http://wn.com/Mitsubishi_LVPlusII_Laser_Cutting_625_inch_Mild_Steel, 2009.

Capítulo 8

Conclusiones y Futuras Líneas de Investigación

8.1. Conclusiones

En este capítulo se presentan diferentes conclusiones generadas a lo largo de la investigación realizada para esta tesis. Cada una de las conclusiones enmarca los principales aspectos a considerar para el desarrollo de ésta. Como conclusión general se ha logrado el desarrollo de un sistema para la selección de procesos de corte no convencionales. Este sistema utiliza un modelo de selección basado en técnicas de lógica difusa, generado a partir de reglas y una base de conocimiento obtenida del conocimiento de diversos expertos. A partir de una sencilla captura de los parámetros de una pieza, el sistema ofrece las opciones de corte más apropiadas en base a los requerimientos de una pieza, permitiendo a un usuario **no experto** la selección del proceso más adecuado con énfasis en una prioridad predefinida: acabado, coste o tiempo, de una manera cuantitativamente acertada.

La herramienta de selección de procesos de corte, es un instrumento que facilita la toma de decisiones durante la elección de un proceso de corte no convencional. A partir de la metodología propuesta se desarrolló un sistema de software, el sistema “*Metal Cutting Process Selector V1.1©*” o MCPS el cual permite a un usuario no experto conocer de manera rápida y sin complicaciones de uso, las opciones de corte más apropiadas.

El sistema presentado utiliza solamente los principales procesos de corte no convencionales para el corte de chapa metálica: corte por láser, agua, plasma y

oxicorte. La interface es totalmente amigable, de fácil funcionamiento y comprensión por lo que puede ser utilizado por cualquier usuario con conocimientos básicos de procesos.

De acuerdo a la información proporcionada por el usuario, es decir, los requerimientos de la pieza a cortar, el sistema presenta de forma ordenada los procesos de corte más convenientes. Es posible llegar a la correcta selección de un proceso de corte de chapa metálica con un alto grado de confiabilidad mediante esta herramienta basada en técnicas de lógica difusa, sin la necesidad de ser un experto en procesos de manufactura.

De acuerdo a los experimentos realizados se pudo comprobar que el sistema MSPC, al igual que un experto, es capaz de presentar en el correcto orden los diferentes procesos de corte de acuerdo a las prioridades elegidas.

A continuación se presentan las conclusiones por capítulo.

8.1.1. Tecnologías de Corte No Convencionales

En este capítulo se presentaron diversos procesos para el corte de chapa metálica. La obtención del proceso ideal para el corte de chapa metálica depende en gran parte del conocimiento del usuario y/o la experiencia que este posea. La previa adquisición de conocimientos técnicos es necesaria para la selección del proceso.

Debido a la gran cantidad de procesos de corte no convencionales, se determinó que es conveniente conocer ampliamente los procesos de manufactura en general para optimizar el proceso de selección. El uso de sistemas de ayuda en el proceso de selección permitirá la ágil elección del proceso más adecuado con características de tiempo, calidad y coste aceptables, sin obligar al usuario a dominar los conocimientos y aspectos técnicos de cada proceso no convencional.

8.1.2. Metodologías para la Selección de Procesos de Fabricación

Se presentaron diversas metodologías para la selección de procesos de corte. El uso de estas metodologías es una alternativa viable que permite elegir de manera rápida y fácil un proceso o alternativas de procesos basándose en la cantidad de producción y en el material que se desea utilizar. Sin embargo, debido a la complejidad de los diversos procedimientos para la selección de procesos, bien sea matemáticamente o por el conocimiento previo que se tenga

de cada proceso, existe aún la necesidad de una herramienta o método sencillo y de fácil utilización que sirva como herramienta de selección de los procesos de corte no convencionales, el cual tenga como objetivo identificar los atributos y obtener la más apropiada combinación de atributos en conjunción con los requerimientos reales de la aplicación de maquinado. Los esfuerzos deben ampliarse para determinar los atributos que influyan en la selección de un proceso no convencional para una aplicación dada, utilizando un enfoque lógico, y que elimine los procesos no apropiados.

8.1.3. Inteligencia Computacional

Se presentaron diversos componentes del *Soft Computing*: las redes neuronales, los algoritmos genéticos, y la lógica difusa. Cada uno de ellos posee una estructura que permite la asimilación del conocimiento mediante el uso de algoritmos. Como se mostró en la revisión de aplicaciones de Inteligencia Computacional en los Procesos de Selección, los componentes del *Soft Computing* permiten asimilar el comportamiento humano para la resolución de problemas en base a aproximaciones, sentido común, consideración de analogías o inteligencia. La aplicación y el éxito de cada uno de los componentes del *Soft Computing* dependerá de la aplicación deseada.

8.1.4. Lógica Difusa

La Lógica Difusa permite asimilar el comportamiento humano mediante el uso de variables lingüísticas que posibilitan su aplicación en diversos conjuntos difusos a fin de encontrar la solución a un problema que no pueda resolverse de manera matemática simple, es una herramienta útil cuando se requiere el conocimiento de un experto para un problema dado.

No existe una fórmula exacta para la resolución de un problema, pero es posible aproximarse o incluso igualar el conocimiento de los expertos mediante el uso de técnicas como la lógica difusa para la resolución de problemas.

8.1.5. Sistema Experto para la Selección de Procesos de Corte No Convencionales

En este capítulo se presentó el diseño de un sistema para la selección de procesos de corte no convencionales como respuesta a la necesidad de una herramienta de fácil utilización que pueda emular el comportamiento que tendría un experto al seleccionar un proceso de corte no convencional. Este sistema

identifica los atributos de los diferentes procesos mediante el uso de técnicas de lógica difusa y permite obtener la más apropiada combinación de atributos en conjunción con los requerimientos reales de la pieza a cortar.

8.1.6. Experimentos y Resultados

La herramienta de selección de procesos de corte, es un instrumento que facilita la toma de decisiones durante la elección de un proceso de corte no convencional. A partir de la metodología propuesta en el Capítulo 6, se desarrolló un sistema de software, el cual permite a un usuario no experto conocer de manera rápida y sin complicaciones de uso, las opciones de corte más apropiadas.

El sistema presentado utiliza solamente los principales procesos de corte no convencionales para el corte de chapa metálica: corte por láser, agua, plasma y oxicorte. La interface es totalmente amigable, de fácil funcionamiento y comprensión por lo que puede ser utilizado por cualquier usuario con conocimientos básicos de procesos.

De acuerdo a los requerimientos de la pieza a cortar, el sistema presenta de forma ordenada los procesos de corte más convenientes. Es posible llegar a la correcta selección de un proceso de corte de chapa metálica con un alto grado de confiabilidad mediante esta herramienta basada en técnicas de lógica difusa, sin la necesidad de ser un experto en procesos de manufactura.

De acuerdo a los experimentos realizados en este capítulo, se pudo comprobar que el sistema MSPC, al igual que un experto, es capaz de presentar en el correcto orden los diferentes procesos de corte de acuerdo a las prioridades elegidas.

8.2. Futuras Líneas de Investigación

A corto plazo sería interesante la incorporación de otros procesos de corte además de los considerados para el desarrollo del sistema MSCP. Asimismo aumentar la cantidad de materiales a considerar ya que en este trabajo el tipo de material fue seleccionado del nivel 1 de la base de datos de materiales de CES Edupack©.

Otra línea futura es el desarrollo de un sistema inteligente basado en la lógica difusa en donde pueda realizarse una completa selección de procesos de

manufactura no sólo en corte de chapa, sino dividir el sistema en diversas familias de procesos y realizar una selección entre cada tipo de familia. Asimismo, que el sistema tenga la capacidad de tratar procesos encadenados con influencias mutuas p.e. preprocesos, procesos y postprocesos.

Finalmente se pueden introducir mejoras en la interface gráfica del sistema MSCP, por ejemplo, la detección de ángulos y perforaciones podría realizarse por medio de procesamiento digital de imágenes mediante el desarrollo de un algoritmo que permita analizar una imagen en un archivo para detectar automáticamente las características de la pieza e introducir esos valores al sistema, sin necesidad de que el usuario tenga que definir esos valores por medio de un previo análisis.



Apéndice A

MCPS: Manual de Usuario

A.1. Introducción

Este manual proporciona una explicación detallada del funcionamiento del sistema *Metal Cutting Process Selector V1.1* (MCPSv1.1©).

El sistema *Metal Cutting Process Selector* tiene como objetivo ser una herramienta que facilite al usuario tomar una decisión en cuanto al tipo de corte no convencional óptimo para una pieza específica.

Aunque el sistema es muy intuitivo y fácil de usar, se recomienda leer primero el manual de usuario antes de usar el sistema ya que muestra paso a paso toda la funcionalidad del sistema de una manera gráfica.

A.2. Objetivo del Manual

El objetivo de este manual es ayudar y guiar al usuario en el dominio el sistema *Metal Cutting Process Selector*, de una manera sencilla y sin complicaciones mediante una descripción detallada con ilustraciones demostrativas paso a paso.

A.3. Especificaciones Técnicas

- Mínimo 512 Mb en RAM.
- Sistema operativo Windows XP©o superior.

-
- FRAMEWORK .NET
 - Microsoft SQL Server 2005©

A.4. Inicio del Sistema

Para iniciar el sistema sólo es necesario que dar doble click en el ícono del sistema MCPS, como se muestra en la Figura A.1.

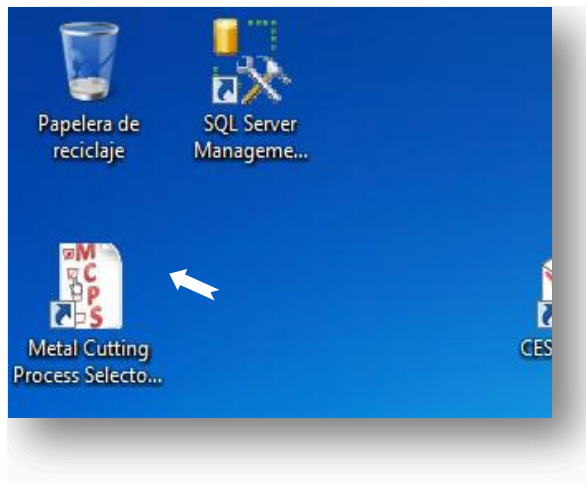


Figura A.1: Ícono del Sistema MCPS.

A.5. Uso del Sistema

A.5.1. Opciones del Menú

Una vez iniciado el sistema *Metal Cutting Process Selector* se mostrará la pantalla principal (ver Figura A.2). Dentro de esta pantalla se encuentra un menú con las siguientes opciones:

Archivo (Ver Figura A.3)

Nuevo. Crea un proyecto nuevo para la comparación de procesos.

Abrir. Abre un proyecto previamente guardado.

Guardar. Guarda el proyecto que esta en uso.

Imprimir gráficos. Imprime las gráficas con los resultados dados de acuerdo a la prioridad seleccionada.

Cerrar. Permite cerrar el sistema.

Historial. Cuenta con un registro de los proyectos guardados más recientes.

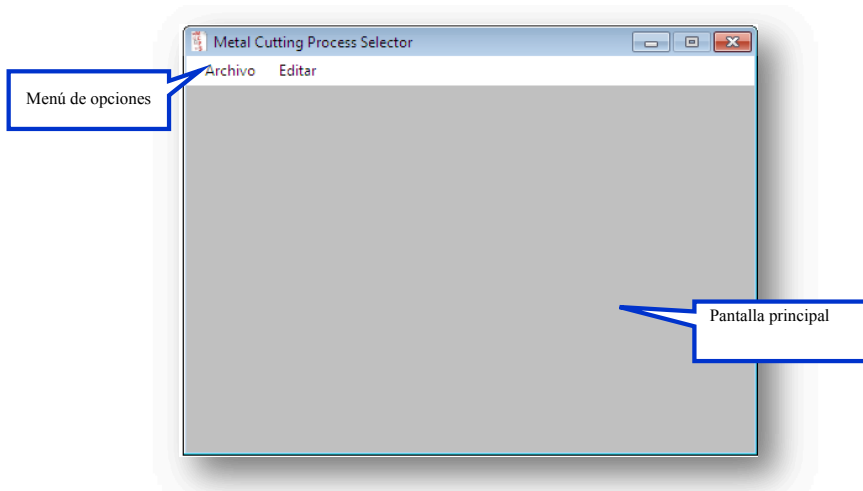


Figura A.2: Pantalla principal del Sistema MCPS

Editar (Ver Figura A.4)

Base de conocimiento. Permite una conexión parcial con los datos que son más susceptibles a cambios para su edición.

A.6. Proyecto Nuevo

Para realizar un nuevo proyecto deberá seleccionar Archivo → Nuevo (Figura A.5). Esto desplegará la pantalla con los campos para seleccionar las características de la pieza a evaluar (Figura A.6).

Una vez en esta pantalla tiene la opción de abrir una imagen con la pieza (Figura A.7) y de ahí seleccionar las características necesarias o bien seleccionarlas directamente si cuenta con la pieza físicamente. No es obligatorio abrir una imagen de la pieza en cuestión.

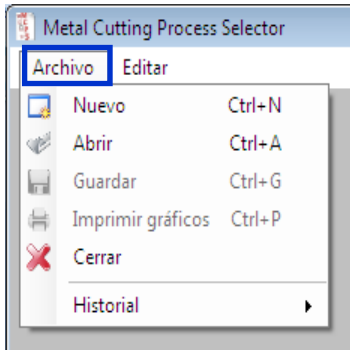


Figura A.3: Menú Archivo

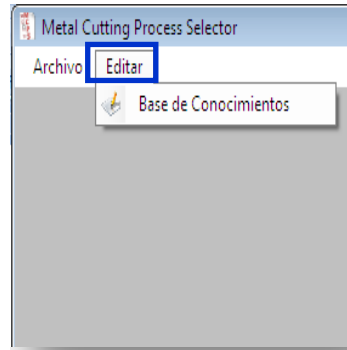


Figura A.4: Menú Editor

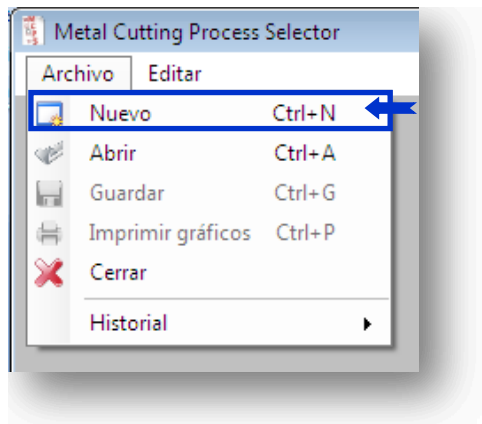


Figura A.5: Procedimiento para crear un nuevo proyecto.

A.7. Selección de Parámetros

Primeramente es necesario seleccionar el material que se va a utilizar (Figura A.8). Enseguida se debe seleccionar el espesor de la pieza a cortar. Se puede ingresar directamente o navegar por los valores con las flechas (Figura A.9). El rango de espesores permitido va desde 0.1 hasta 200.0 milímetros.



Figura A.6: Pantalla para captura de datos.

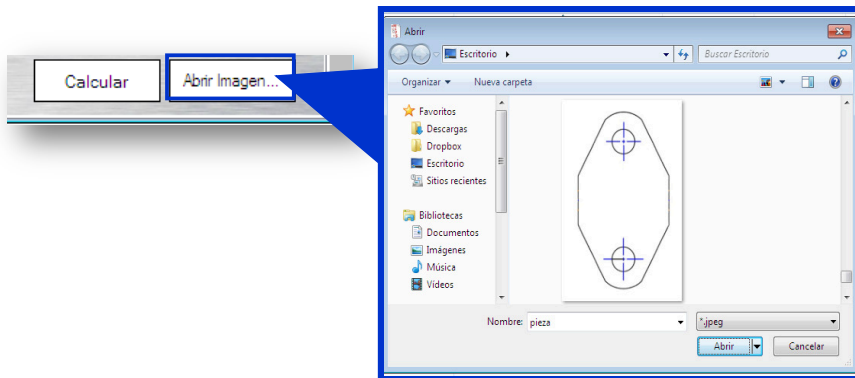


Figura A.7: Procedimiento para abrir la imagen de la pieza.

Después, en base a la geometría de la pieza, se selecciona el número de perforaciones con las que cuenta (Figura 9), así como el número de ángulos

(ver Figura A.11).



Figura A.8: Procedimiento para seleccionar el material.



Figura A.9: Procedimiento para seleccionar el espesor.

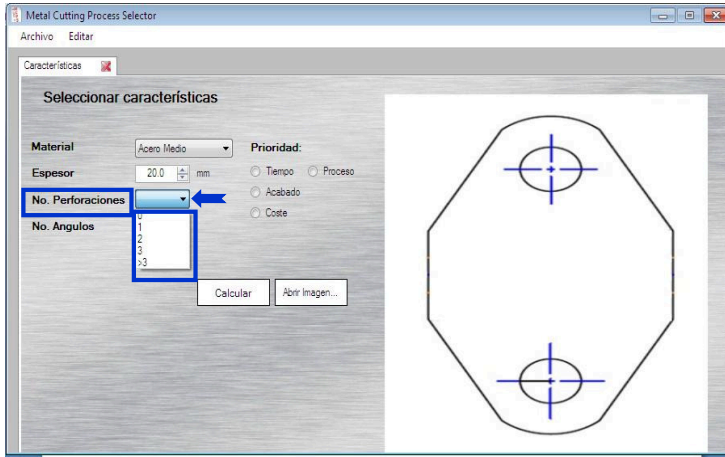


Figura A.10: Procedimiento para selección de número de perforaciones.

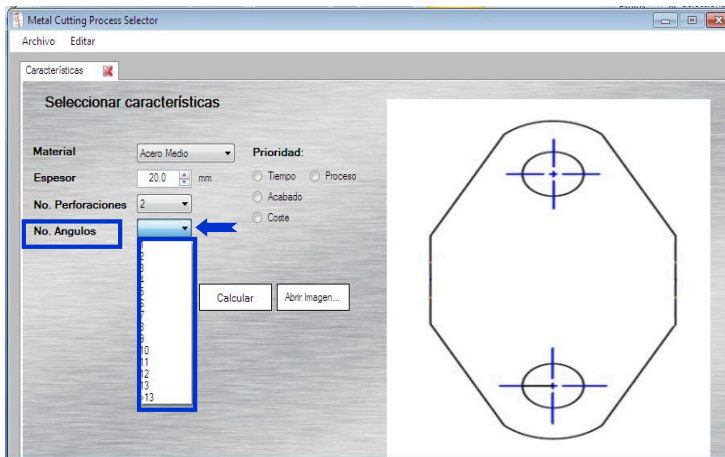


Figura A.11: Procedimiento para selección de número de ángulos.

Posteriormente, se selecciona una de las cuatro posibles prioridades (Figura A.12):

- tiempo
- acabado
- coste
- proceso

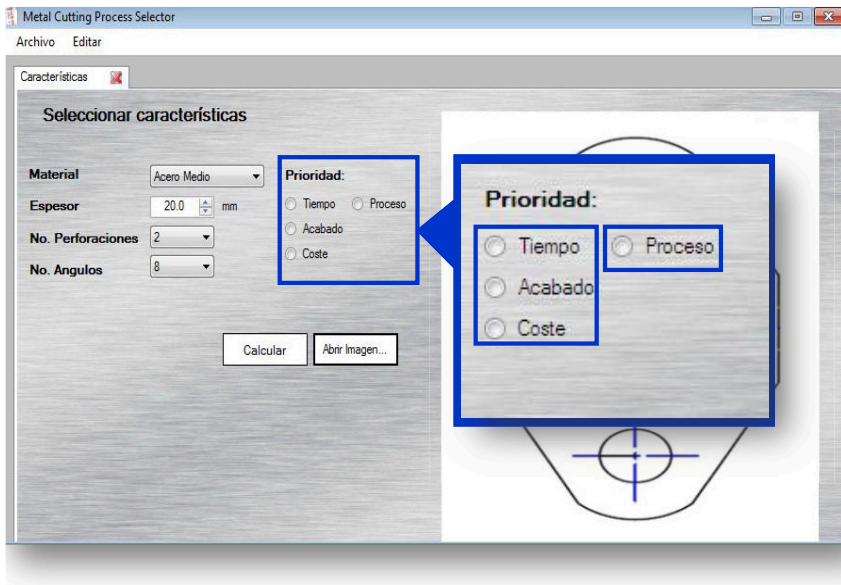


Figura A.12: Procedimiento para la selección de prioridades.

Por último para mostrar los resultados de selección una vez introducidos los parámetros y la prioridad deseada, tendrá que pulsar click en el botón calcular (Figura A.13), que desplegará una gráfica con los procesos más adecuados en orden descendente.

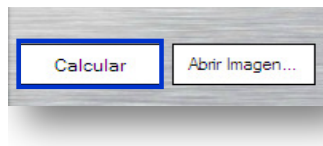


Figura A.13: Procedimiento para mostrar los resultados de selección.

A.8. Resultados

Las primeras tres prioridades darán como resultado tres gráficas con todos los procesos, siendo la gráfica principal el procedimiento más recomendado para cortar la pieza. La prioridad proceso mostrará las gráficas con el comportamiento de cada proceso en relación a la pieza a cortar.

A.8.1. Resultados Basados en las Prioridades

En la Figura A.14 se muestran los resultados de selección para los requerimientos de una pieza dada. Los resultados se muestran en forma de barras con su respectivo valor numérico de forma descendente. La gráfica principal son las opción más recomendadas en base a la prioridad seleccionada. De forma secundaria se muestran las mejores opciones para las prioridades no seleccionadas.

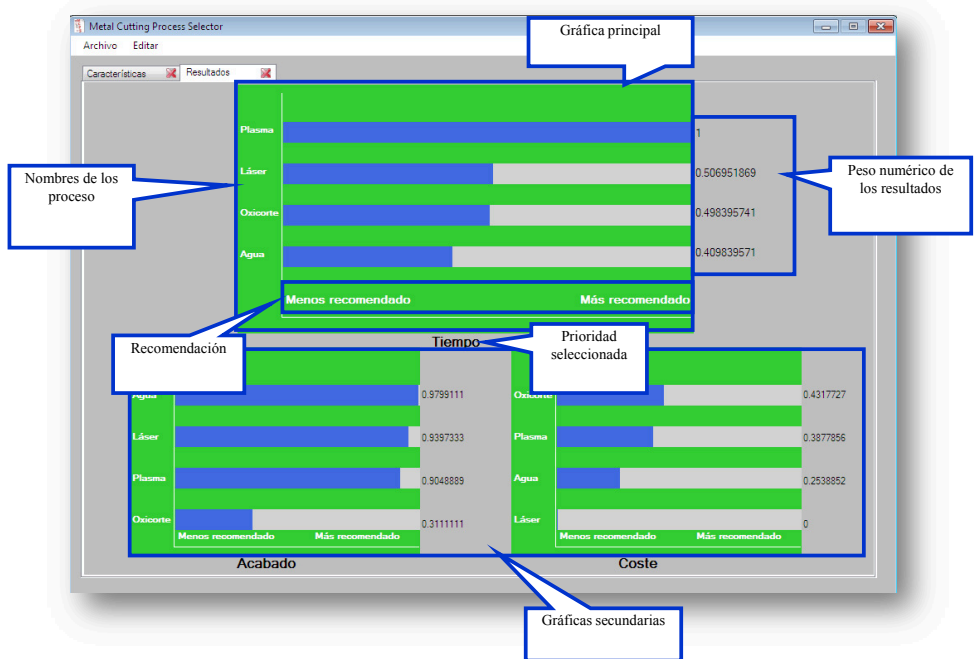


Figura A.14: Resultados de selección para prioridades tiempo, acabado y coste. En este ejemplo se seleccionó el tiempo como prioridad, es por esto que se muestra en la gráfica principal.

A.8.2. Resultados Basados en el Proceso

Cuando se selecciona proceso como prioridad, como resultado se mostrarán las capacidades de cada proceso para cortar la pieza (Figura A.15). De esta manera se podrán comparar todos los procesos.

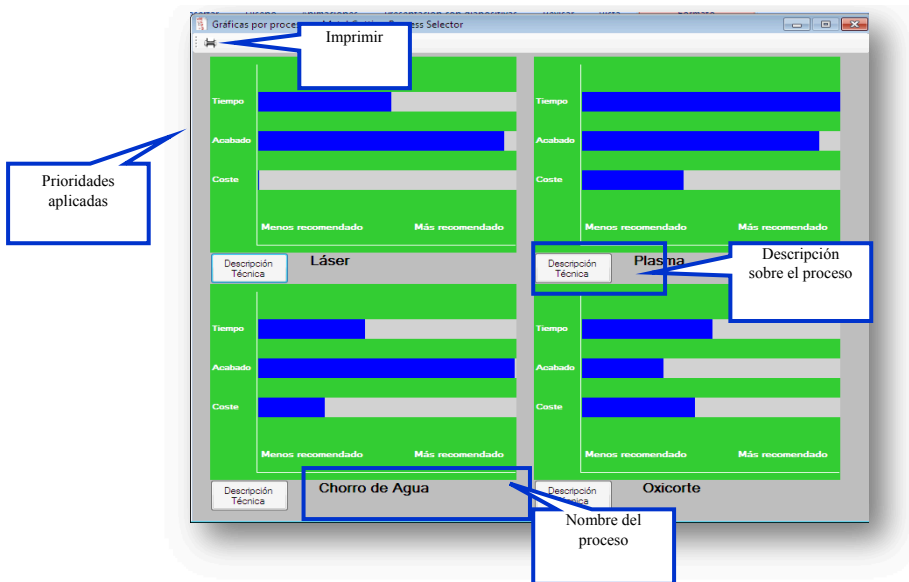


Figura A.15: Resultados de selección basados en procesos.

Dentro de la pantalla de resultados, se encuentran los botones para “Descripción Técnica”, al hacer click mostrarán una descripción detallada acerca del respectivo proceso de corte (ver Figura A.16). Asimismo, dentro de la pantalla de la descripción técnica del proceso de corte, existe un botón en la parte inferior derecha, al presionarlo mostrará un control para la reproducción del respectivo video (Figura A.17).

A.9. Guardar un Proyecto

Para guardar un proyecto tendrá que seleccionar Archivo → Guardar (Figura A.18).

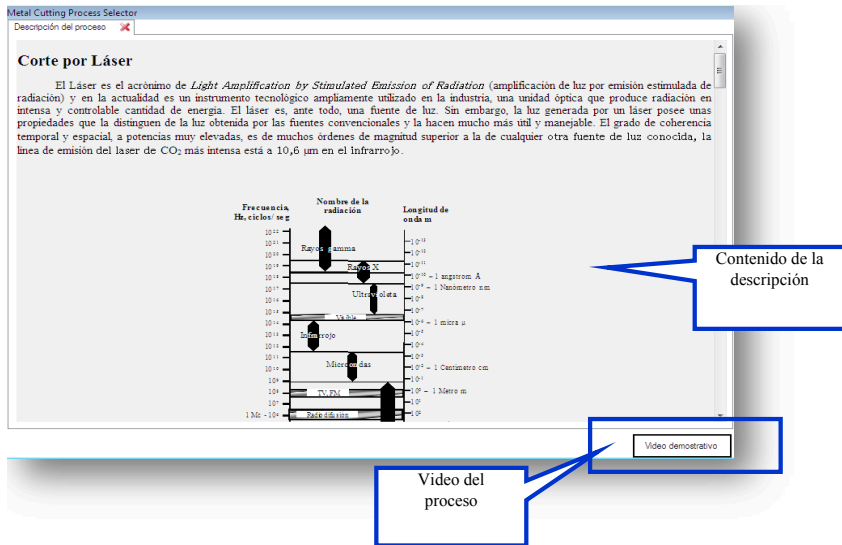


Figura A.16: Pantalla de la descripción técnica de un proceso.

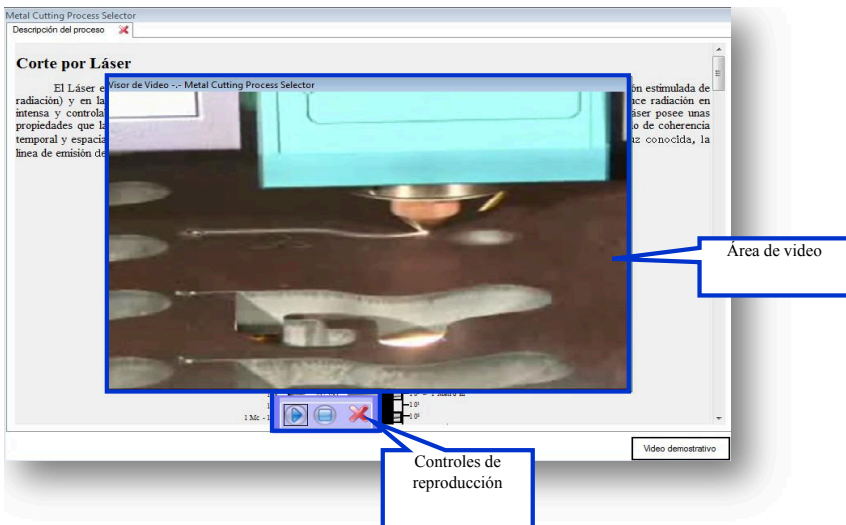


Figura A.17: Procedimiento para mostrar video explicativo.

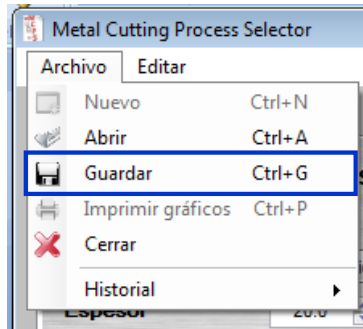


Figura A.18: Procedimiento para guardar un proyecto.

Se mostrará una siguiente ventana de diálogo donde seleccionará la ubicación de su proyecto, así como el nombre que lo identificará (Figura A.19). Para finalizar se presiona el botón guardar para que se guarde el proyecto.

A.10. Abrir un Proyecto Guardado

Para abrir un proyecto previamente guardado es necesario ir al menú Archivo → Abrir (Figura A.20). Con esto se mostrará una ventana de diálogo donde se podrá buscar el fichero que contiene el proyecto guardado (Figura A.21) y se presiona el botón abrir.

Una vez realizado lo anterior se mostrará la pantalla que contiene los requerimientos de la pieza del proyecto, así como la imagen que se haya cargado (Figura A.22). También se mostrará un recuadro con la información de los procesos recomendados en base al tipo de prioridad requerida. En caso de no haber cargado una imagen de una pieza al momento de guardar indicará que la imagen no se encuentra disponible.

A.11. Imprimir Resultados

Para imprimir deberá ir al menú Archivo → Imprimir. Si se encuentra en la pantalla principal (Figura A.23), o en la pantalla de procesos (Figura A.24) sólo con presionar el icono de impresora, podrá imprimir. Se mostrará un ventana de diálogo para guardar el documento a imprimir. Este documento lo podrá imprimir cuando desee sin necesidad de tener la aplicación en ejecución.

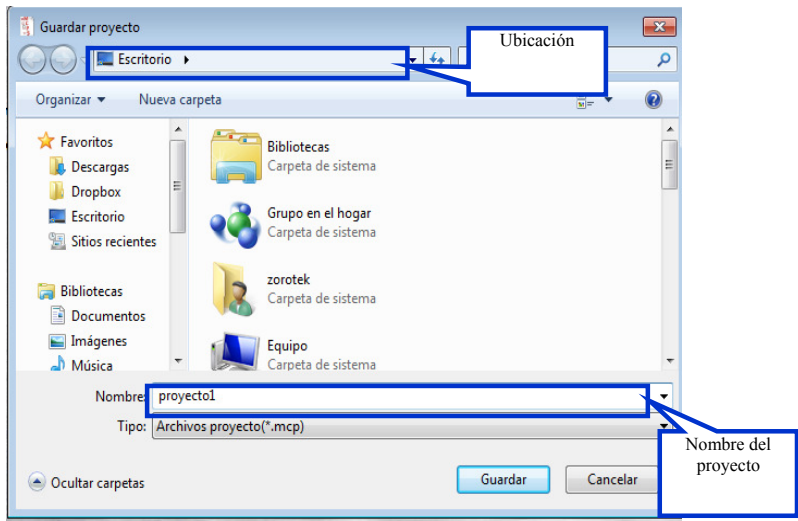


Figura A.19: Ventana de diálogo para guardar un proyecto.

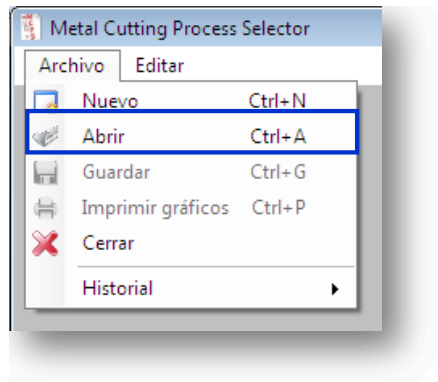


Figura A.20: Procedimiento para abrir un proyecto guardado.

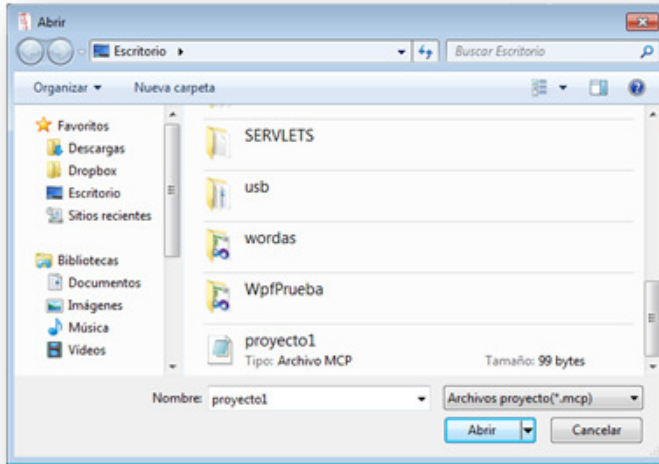


Figura A.21: Ventana de diálogo para abrir un proyecto guardado.

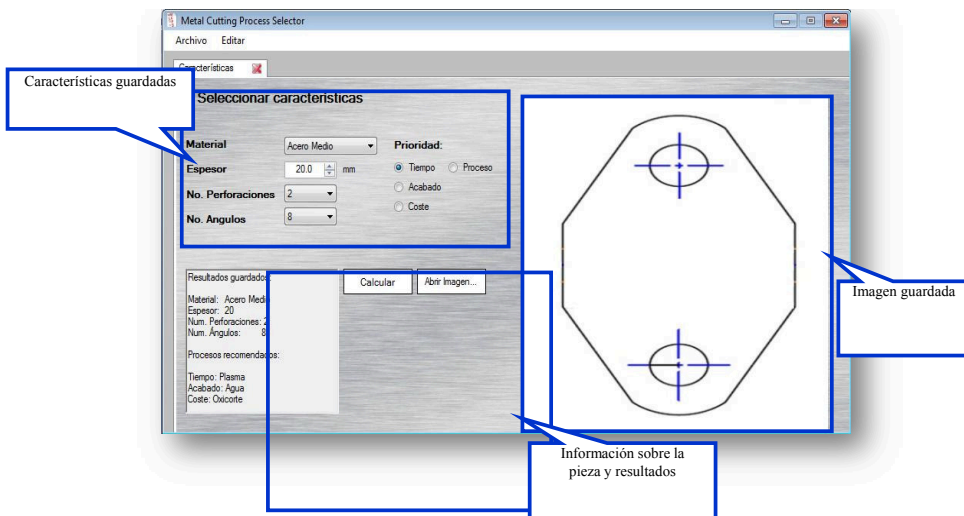


Figura A.22: Recuperación de datos del proyecto.

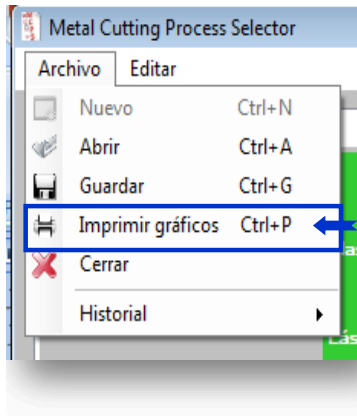


Figura A.23: Procedimiento para imprimir gráficos.

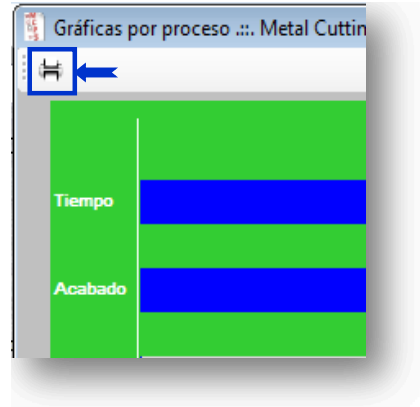


Figura A.24: Impresión desde pantalla de procesos.

A.12. Edición de Base de Conocimiento

Para editar la base de conocimientos deberá seleccionar en Editar → Base de Conocimientos (Figura A.25).

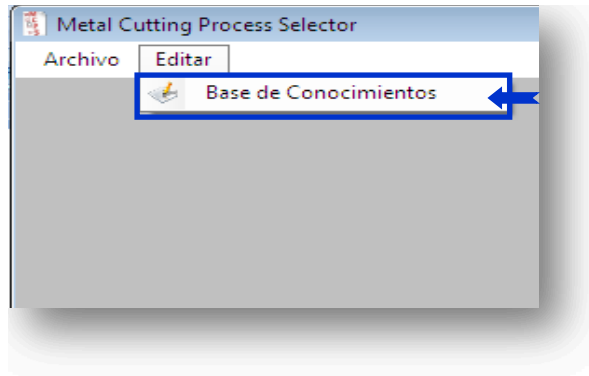


Figura A.25: Procedimiento para editar base de conocimiento.

Al hacer esto se mostrará una ventana de alerta (Figura A.26). Hay que tener cuidado en esta parte del sistema. Cualquier cambio inapropiado podría causar resultados incorrectos a los deseados.

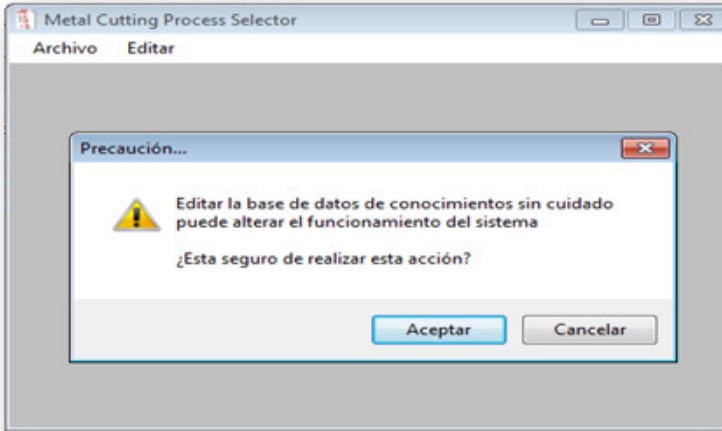


Figura A.26: Alerta en la edición de base de conocimiento.

Una vez aceptado mostrará la ventana con las opciones que se proporcionan para su edición (Figura A.27).

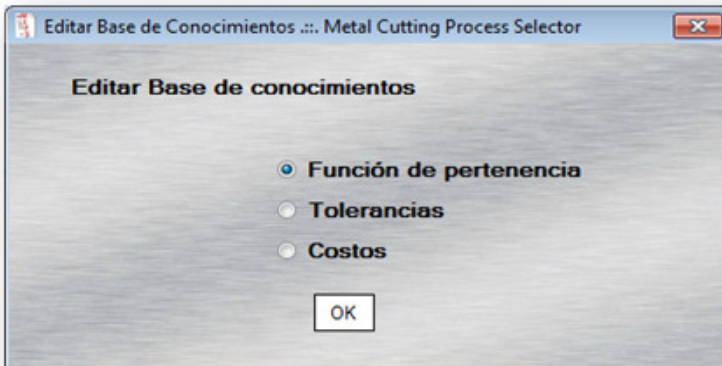


Figura A.27: Opciones de edición en la base de conocimiento.

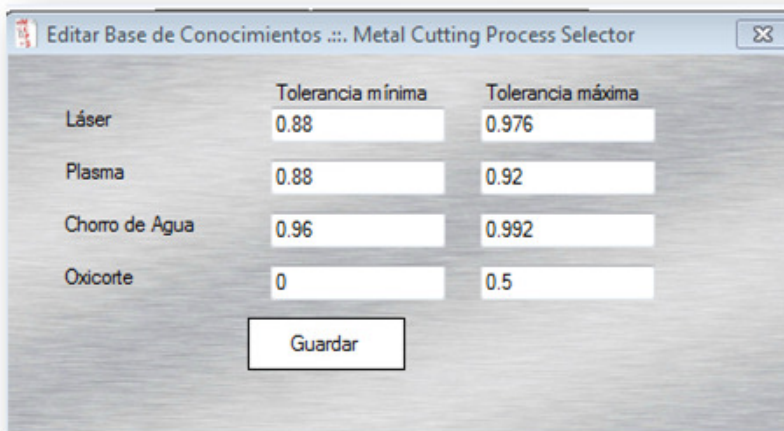
Una vez seleccionada alguna opción se presiona el botón ok y se muestran algunos de los siguientes contenidos según corresponda.

A.12.1. Función de Pertenencia

Esta opción permite ajustar los puntos a , b , c y d de las funciones de pertenencia trapezoidales para las relaciones material-espesor, y la complejidad de una pieza. Esta función no está activada en la versión 1.1.

A.12.2. Tolerancias

Dentro de ésta opción se permite editar las diferentes tolerancias pertenecientes a los procesos de corte (Figura A.28).



The screenshot shows a dialog box titled "Editar Base de Conocimientos :: Metal Cutting Process Selector". It contains a table with two columns: "Tolerancia mínima" and "Tolerancia máxima". The rows represent different cutting processes: Láser, Plasma, Chorro de Agua, and Oxicorte. Below the table is a "Guardar" button.

	Tolerancia mínima	Tolerancia máxima
Láser	0.88	0.976
Plasma	0.88	0.92
Chorro de Agua	0.96	0.992
Oxicorte	0	0.5

Figura A.28: Edición de tolerancias para diversos procesos.

A.12.3. Costes

Esta opción permite modificar los costes de operación del proceso por hora (Figura A.29). Una vez realizadas las modificaciones pertinentes, se presiona el botón Guardar con lo que desplegará un mensaje de confirmación donde acepta o rechaza la modificación según sea el caso. En caso que sea afirmativo

se aplicarán los cambios de forma permanente desplegando un mensaje de que se aplicaron los cambios exitosamente.



	Coste por hora
Láser	46.83
Plasma	28.67
Chorro de Agua	17.82
Oxicorte	6.26

Guardar

Figura A.29: Edición de los costes de proceso por hora.

