



**CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES**

**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**



**DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA USANDO UN SISTEMA  
INTELIGENTE PARA IDENTIFICAR EL DESEMPEÑO DE LAS  
VARIABLES ENVUELTAS EN EL MAQUINADO DE ALTA VELOCIDAD  
DEL TI 6AL-4V**

**POR**

**M.C. INDIRA GARY ESCAMILLA SALAZAR**

**TESIS**

**DOCTORADO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL Y DE MANUFACTURA**

**SALTILLO, COAH. AGOSTO DEL 2011**

**Desarrollo de una Metodología usando un Sistema Inteligente  
para Identificar el Desempeño de las Variables Envueltas en el  
Maquinado de Alta Velocidad del Ti 6Al-4V**

por

**M.C. Indira Gary Escamilla Salazar**

**Tesis**

Presentada al Programa Interinstitucional en Ciencia y Tecnología

Sede

**Corporación Mexicana de Investigación en Materiales S.A. de C.V.**

como requisito parcial para obtener el grado académico de

**Doctor en Ciencia y Tecnología  
Especialidad en Ingeniería Industrial y Manufactura**

**Programa Interinstitucional en Ciencia y Tecnología /COMIMSA**

Saltillo Coahuila, Agosto del 2011

# **Desarrollo de una Metodología usando un Sistema Inteligente para Identificar el Desempeño de las Variables Envueltas en el Maquinado de Alta Velocidad del Ti 6Al-4V**

por

**M.C. Indira Gary Escamilla Salazar**

## **Comité Revisor**

**Tutor Académico:** Dra. Patricia del Carmen Zambrano Robledo  
Profesor Investigador FIME-UANL

**Tutor Académico:** Dr. Pedro Pérez Villanueva  
PICYT-Ing. Industrial y Manufactura-COMIMSA

**Revisor No.1:** Dr. Victor Páramo López  
Compañía FRISA Forjados S.A. de C.V.

**Revisor No.2:** Dr. Octavio Covarrubias Alvarado  
Compañía FRISA Forjados S.A. de C.V.

**Revisor No.3:** Dr. Luis Martín Torres Treviño  
Centro de Innovación, Investigación y Desarrollo en Ingeniería y Tecnología

**Tutor de planta:** M. C. Claudia Aracely González Rodríguez  
Corporación Mexicana de Investigación en Materiales S.A. de C.V.

Saltillo Coahuila, Agosto del 2011

**Corporación Mexicana de Investigación en Materiales, S. A. de C. V.**  
**Gerencia de Desarrollo Humano**  
**División de Estudios de Posgrado**

Los abajo firmantes, miembros del Jurado del Examen de Grado de Tutorial recomendamos que la Tesis “**Desarrollo de una metodología usando un Sistema Inteligente para Identificar el Desempeño de las Variables Envueltas en el Maquinado de Alta Velocidad del Ti 6Al-4V**” realizada por la alumna **Indira Gary Escamilla Salazar** matrícula **026IM3031**, sea aceptada para su defensa como Doctor en Ciencia y Tecnología con Especialidad en **Ingeniería Industrial y de Manufactura**.

El Comité Tutorial

---

Tutora Académica

**Dra. Patricia del C. Zambrano Robledo**

---

Tutor Académico

**Dr. Pedro Pérez Villanueva**

---

Tutor en Planta

**M. C. Claudia A. González Rodríguez**

---

Vo. Bo.

**M. C. Claudia A. González Rodríguez**

Coordinación General de Estudios de Posgrado – COMIMSA

**Corporación Mexicana de Investigación en Materiales**  
**Gerencia de Desarrollo Humano**  
**División de Estudios de Posgrado**

Los abajo firmantes, miembros del Jurado del Examen de Grado del alumna, **Indira Gary Escamilla Salazar**, una vez leída y revisada la tesis titulada **“Desarrollo de una metodología usando un Sistema Inteligente para Identificar el Desempeño de las Variables Envueltas en el Maquinado de Alta Velocidad del Ti 6Al-4V”**, aceptamos que la referida tesis revisada y corregida sea presentada por el alumno para aspirar al grado de Doctor en Ciencia y Tecnología con Especialidad en Ingeniería Industrial y de Manufactura durante el Examen de Grado correspondiente.

Y para que así conste firmamos la presente a los 29 días del mes de agosto del año 2011.

Dr. Luis Martín Torres Treviño  
Presidente

Dr. Octavio Covarrubias  
Alvarado  
Secretario

Dr. Víctor Páramo López  
Vocal

Dr. Pedro Pérez Villanueva  
Vocal

Dra. Patricia Del Carmen  
Zambrano Robledo  
Vocal

**A MI AMADISIMO ESPOSO:**

Bernardo González que ha compartido conmigo la vida, los sueños

**A MIS PADRES:**

Rafael y Elsia que siempre ha sido mi motor para seguir adelante

**A MIS HERMANOS:**

Keny, Elsy y Rafa

**A MIS SOBRINOS:**

Mia, Zury y el próximo a nacer Manuel Alejandro

**A MIS FAMILIARES Y AMIGOS:**

Por los interminables momentos compartidos

**A MIS MAESTROS:**

Los cuales siempre fueron guías

## Agradecimientos

A Dios por permitirme concluir una de las metas más importantes de mi vida profesional.

A mi Marido **Bernardo González Ortíz** por ser la principal motivación en mi vida.

A mis padres **Rafael Escamilla Alanís y Elsia Salazar Cavazos**; a mis hermanos **Kenia y Alejandro, Elsia y Juan Angel, Rafa y Carolina** y a mis sobrinos **Mia, Zury y el bebe por nacer Manuel Alejandro** por su apoyo incondicional.

A mi **Abuelita, Tios y Primos** por ser la mejor familia que Dios me pudo dar.

A mis grandes amigos por su apoyo y amistad incondicional.

A mis tutores, **Dr. Luis Martín Torres Treviño, Dra. Patricia del Carmen Zambrano Robledo, Dr. Pedro Pérez Villanueva** por compartir sus conocimientos y principalmente por brindarme su amistad.

A los académicos que de forma directa e indirecta contribuyeron en mi formación **MC Esteban Báez Villarreal, MC Arturo González Escamilla, Dr. Moisés Hijonosa, Dr. Rogelio Garza, Dr. Octavio Covarrubias, Dr. Victor Páramo, Dra. Martha P. Guerrero, Dra. Adriana Salas, Dr. Rafael Colás, MC Nelda Lilia Gámez, MC. Francisco Delgado, MC. Leticia Flores, MC. Santiago Neyra, MC. Maria Eugenia Cavazos, Dra. Maribel de la Garza, Dr. Arturo Reyes, Dra Tania y Dr. Martín, Dr. Manuel Román Piña, MC. Roberto Mireles, MC. José Luis Castillo, MC. J. A. Franco Quintanilla, MC. Maria Guadalupe Ramírez, MC. Arnulfo Treviño, MC. Mario Saldaña, MC. Oscar Zapata, MC. José Luis Arredondo, MC. Enrique Castillo, Lic. Rafael Mayorga** y todavía hay muchos más.

A todos mis compañeros y amigos, que conocí durante mis estudios y que siempre los llevaré presentes, especialmente: a todos, que es una lista interminable pero espero no omitir a nadie, si es así disculpenme A todos mi amigos de **COMIMSA Johana, Nacho y sus papás, David, Rolando, Cuahutemoc, Nora, Adriana, Viridiana, Angela, Esme, Olga, Deniz, Eva, Susana y demás.** A mis amigas de toda la vida **Malena,**



**Raquel, Claudia, Paty, Flor, Miguel, Sara, Juan, Roel, MaryJos, Robert, Paty, Angeles, Sofir, Sandra, Brenda, Adriana, Laura, Deyanira, Nereyda, Ezequiel, Yumei, a todo el personal que comparte día a día conmigo: el departamento de máquinas-herramientas**

A la **M. C. Claudia González**, coordinadora del Posgrado de COMIMSA por el apoyo brindado durante mis estudios y por creer siempre en mí .

A las personas que día a día hacen posible el desempeño del Posgrado COMIMSA, **personal administrativo del posgrado Juan Carlos, Maru, Mary, Pily, Paloma, Blanca, Indira, Silvita.**

Agradezco los apoyos recibidos durante mi formación doctoral a dos importantes Instituciones del ámbito Científico y Tecnológico de este país; sin ellas mi progreso y desarrollo académico, actividades de movilidad e investigación y producción científica no hubieran sido posibles: **El Consejo Nacional en Ciencia y Tecnología (CONACYT)**, A la **Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica**, Al **Programa de Mejoramiento al Profesorado (PROMEP)** y a la **Corporación Mexicana de Investigación en Materiales.**

A mis revisores, **Dr. Octavio Covarrubias** y al **Dr. Victor Páramo López** por su apoyo durante el proyecto.

## “Autobiografía”

**Indira Gary Escamilla Salazar**, nació el 4 de agosto de 1975 en la ciudad de Monterrey, N.L., de padres Rafael Escamilla Alanís y Elsia Salazar Cavazos. Ingeniero Mecánico Administrador desde 1998, con Maestría en Ciencias de la Ingeniería de Manufactura con especialidad en Automatización desde 2004, ambas por la Universidad Autónoma de Nuevo León, actualmente estudiando el Posgrado Interinstitucional en Ciencia y Tecnología a nivel Doctorado con opción terminal en las disciplinas de Manufactura e Ingeniería Industrial, estudios llevados a cabo en la Corporación Mexicana de Investigación en Materiales, en Saltillo Coahuila. Reconocida con el perfil de PROMEP, otorgado por Secretaria de Educación Pública. Miembro activo del Comité Técnico de la Carrera de Ingeniero Mecánico Administrador, así como tutor en sus diversas modalidades tales como individual, carrera. Su experiencia laboral le permitieron desarrollar su habilidad en el área de maquinado participando en las siguientes empresas GENERAL ELECTRIC MEDICAL SYSTEMS como Sourcing Project Leader, MOTOR WHEEL DE MEXICO, S.A. DE C.V. desempeñándose como Ingeniero de Manufactura y en FABRICAS MONTERREY, S.A. DE C.V. como Ingeniero Industrial y de Manufactura, su área de investigación es el análisis y optimización de procesos de maquinado y el desarrollo y simulación de diseño mecánico y procesos. Cuenta con 3 publicaciones en revistas indexadas, 1 capítulo de libro y más de 7 participaciones en congresos internacionales. Ha titulado a 6 estudiantes de licenciatura, 2 de maestría. A la fecha ha participado más de 3 Proyectos de Investigación en el área de Manufactura y Materiales.

# Resumen

La gran preocupación que tienen los fabricantes en la industria manufacturera es el obtener parámetros óptimos de maquinado ya que la economía de la operación del proceso de maquinado juega un papel clave en la competitividad en el mercado. Muchos investigadores se han ocupado de la optimización de los parámetros de mecanizado para operaciones de fresado. En esta tesis, se muestran los procedimientos de optimización basada en el algoritmo de optimización de enjambre de partículas para encontrar los parámetros de maquinado en el fresado. Se describe el desarrollo y la utilización de la metodología que determina el frente de Pareto óptimo donde se analizan la velocidad, el avance, la profundidad en el proceso de fresado. La relación entre los parámetros de maquinado y la temperatura, tiempo, tasa de remoción de material, los cuales se obtienen mediante el uso de los datos experimentales, predicciones a través de redes neuronales combinadas con un sistema de enjambre de partículas. Los resultados mostraron que la optimización de enjambre de partículas es un método eficaz para la solución de multi-objetivo los problemas de optimización, y también, que un sistema integrado de redes neuronales y la inteligencia de enjambre se puede utilizar para resolver los problemas complejos de optimización en el maquinado.

Optimum machining parameters are of great concern in manufacturing environments, where economy of machining operation plays a key role in competitiveness in the market. Many researchers have dealt with the optimization of machining parameters for milling operations. In this thesis, optimization procedures based on particle swarm optimization algorithm were developed for find machining parameters in milling operation. It's describes development and utilization of the methodology which determines optimum Pareto's front analyzing feed, speed, depth for milling operation. The relationships between machining parameters and the performance measures of interest are obtained by using experimental data and a swarm intelligent neural network system. Results showed that particle swarm

optimization is an effective method for solving multi-objective optimization problems, and also, that an integrated system of neural networks and swarm intelligence can be used to solve complex machining optimization problems.

# Índice general

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Antecedentes del proyecto . . . . .	1
<b>2. Planteamiento del problema</b>	<b>5</b>
2.1. Descripción del problema . . . . .	5
2.1.1. Antecedentes de la planta . . . . .	5
2.1.2. Descripción de la Problemática de FRISA Forjados S.A. de C.V. . . . .	5
2.2. Preguntas de investigación . . . . .	7
2.3. Hipótesis . . . . .	8
2.4. Objetivos . . . . .	8
2.4.1. Objetivo General . . . . .	8
2.4.2. Objetivos Específicos . . . . .	8
2.5. Justificación . . . . .	9
2.6. Limitación de la tesis . . . . .	11
2.6.1. Delimitación . . . . .	11
2.6.2. Resultados e Impactos Esperados . . . . .	11
2.7. Estructura de la tesis . . . . .	12
<b>3. Revisión bibliográfica</b>	<b>14</b>
3.1. Revisión literaria del Titanio . . . . .	14
3.2. Revisión literaria de sistemas inteligentes . . . . .	17

ÍNDICE GENERAL	II
3.3. Redes Neuronales Artificiales . . . . .	18
3.3.1. Optimización de Cúmulo de Partículas (OCP) . . . . .	19
3.4. Estado del arte para el maquinado del Ti 6Al-4V . . . . .	24
3.4.1. Estado del arte aplicando sistemas inteligentes . . . . .	26
<b>4. Marco Teórico</b>	<b>36</b>
4.1. Conceptos Generales de Maquinado y Rugosidad . . . . .	36
4.1.1. Maquinado y Maquinabilidad . . . . .	36
4.1.2. Rugosidad Superficial. . . . .	39
4.1.3. Temperatura. . . . .	42
4.2. Cúmulo de Partículas (OCP) . . . . .	44
4.2.1. Optimización de cúmulo de partículas para problemas multiobjetivo	48
4.2.2. Líderes en optimización multi-objetivo . . . . .	50
4.2.3. Retener las Partículas No dominadas . . . . .	51
4.2.4. Promover diversidad al crear nuevas soluciones . . . . .	53
<b>5. Metodología de la Investigación.</b>	<b>57</b>
5.1. Introducción . . . . .	57
<b>6. Experimentación</b>	<b>64</b>
6.1. Medición de Datos. . . . .	77
6.1.1. Rugosímetro . . . . .	77
6.1.2. Pirómetro Infrarrojo . . . . .	79
6.1.3. Multianalizador de Señales . . . . .	80
6.1.4. Cúmulo de partículas . . . . .	81
<b>7. Discusión y Resultados</b>	<b>85</b>
<b>8. Conclusiones y Trabajos Futuros</b>	<b>112</b>

ÍNDICE GENERAL	III
<b>Bibliografía</b>	<b>113</b>
<b>A. Apéndice I</b>	<b>119</b>
A.1. BRIDGEPORT VCM 760 . . . . .	119

# Índice de tablas

3.1. Áreas de oportunidad en artículos . . . . .	27
4.1. Emisividad de diferentes materiales. . . . .	44
6.1. Variables en el proceso, unidades y fórmulas . . . . .	65
6.2. Equipo utilizado para las pruebas . . . . .	66
6.3. Diseño de experimentos . . . . .	67
6.4. Variables de la red neuronal. . . . .	84
6.5. Variables del cúmulo de partículas. . . . .	84
7.1. Análisis de Varianza. . . . .	87
7.2. Parámetros del cúmulo de partículas. . . . .	105



# Índice de figuras

2.1. Departamentos de FRISA Forjados S.A. de C.V. . . . . .	6
3.1. Estructura básica de una red neuronal . . . . .	18
3.2. Relación de dominancia en un espacio de 2 dimensiones (bi-objetivo) . . . . .	20
3.3. Frente de pareto con un grupo de soluciones para un espacio de 2 objetivos . . . . .	21
4.1. Ampliación de la ondulación de la superficie . . . . .	41
4.2. Gráfica de Ra para la medición de la rugosidad . . . . .	42
4.3. Emisividad de la pieza en un objeto . . . . .	44
4.4. La topología de vecindad anidada que representa la escena del mejor local cuando $k = 2$ . Cada círculo representa a una partícula . . . . .	45
4.5. La gráfica de todo conectado representa la topología de vecindad con conexión completa (cada círculo representa una partícula). Todos los miembros del cúmulo están conectados entre sí . . . . .	46
4.6. Topología estrella (cada círculo representa una partícula). El principal objetivo es conectar todas las partículas y ellas son conectadas a una. . . . .	46

4.7. Topología árbol, todas las partículas tienen un arreglo en forma de árbol y cada 3 nodos es una partícula [Jan03]. Las partículas son influenciadas por su mejor posición (pbest) y la mejor posición de la partícula marcada en el árbol. En esta figura se puede ver un ejemplo de la topología definida por un árbol rectangular con una altura igual a 3, con 4 partículas en cada una, es decir un total de 21 partículas . . . . .	47
4.8. Estimador de densidad del vecino más cercano . . . . .	51
4.9. Estimador de densidad Kernel . . . . .	52
4.10. Forma de dominación relajada $\epsilon$ . . . . .	52
4.11. Un ejemplo del uso de la dominación de $\epsilon$ en un archivo externo . . . . .	53
5.1. Bosquejo metodológico inicial propuesto . . . . .	58
5.2. Diagrama general donde incluyen los 3 métodos principales de análisis . . . . .	60
5.3. Variables importantes en un proceso de maquinado y métricas a analizar . . . . .	61
6.1. Muestra de pruebas del diseño de experimentos . . . . .	68
6.2. Bridgeport VMC 760 . . . . .	69
6.3. Sistema de sujeción CAT 45 . . . . .	69
6.4. Herramienta de corte (End Mill) . . . . .	70
6.5. Pieza de Ti 6Al-4V . . . . .	71
6.6. Fricción produciendo calor . . . . .	72
6.7. Fluído de corte eliminando el calor del rozamiento entre la herramienta y la pieza de trabajo . . . . .	72
6.8. Lubricación a través de un anillo distribuidor de refrigerante . . . . .	73
6.9. Diagrama de flujo de los pasos del programa de control numérico computarizado	75
6.10. CNC Surfcom 1500SD2 . . . . .	78
6.11. Pirómetro Fluke . . . . .	79
6.12. Medición de temperatura . . . . .	80

6.13. Multianalizador PULSE 3560B. . . . .	81
6.14. Medición de desplazamiento. . . . .	82
6.15. Diagrama que muestra la metodología seguida a través de las redes neuronales y optimización por cúmulo de partículas . . . . .	83
7.1. Gráficas de rugosidad en la primer corrida . . . . .	86
7.2. Gráficas de rugosidad en la segunda corrida . . . . .	86
7.3. Gráficas de rugosidad en la tercer corrida . . . . .	87
7.4. Coeficientes de regresión y valores de inflación . . . . .	88
7.5. Ajuste del modelo de regresión lineal . . . . .	88
7.6. Coeficientes de regresión múltiple y valores de inflación . . . . .	89
7.7. Ajuste del modelo de regresión lineal con interacciones . . . . .	89
7.8. Coeficientes de regresión ridge y valores de inflación considerando el valor de $k=0.02$ . . . . .	90
7.9. Rugosidad real vs predicción con Ridge . . . . .	91
7.10. Mejores valores obtenidos de entrenamiento de la red para la predicción de la rugosidad . . . . .	92
7.11. Resultados de la comparación del valor real vs predicho . . . . .	93
7.12. Resultados de validación para la rugosidad . . . . .	94
7.13. Resultados de la comparación del valor real vs predicho . . . . .	95
7.14. Resultados de validación para la temperatura . . . . .	96
7.15. Gráficas de temperatura en primer corrida de temperatura . . . . .	97
7.16. Gráficas de temperatura en la segunda corrida de temperatura . . . . .	97
7.17. Gráficas de temperatura en la tercer corrida de temperatura . . . . .	98
7.18. Valores obtenidos de entrenamiento de la red para la predicción de la temperatura . . . . .	98
7.19. Gráfica de tiempo . . . . .	99
7.20. Mejores valores obtenidos de entrenamiento de la red para la predicción del tiempo . . . . .	99
7.21. Resultados de la comparación del valor real vs predicho . . . . .	100
7.22. Resultados de validación para el tiempo . . . . .	101

7.23. Mejores valores obtenidos de entrenamiento de la red para la predicción del desplazamiento . . . . . 102

7.24. Resultados de la comparación del valor real vs predicho . . . . . 103

7.25. Resultados de validación para el desplazamiento . . . . . 104

7.26. Frente de pareto de rugosidad vs tiempo . . . . . 107

7.27. Frente de pareto de rugosidad vs MRR . . . . . 108

7.28. Frente de pareto de MRR vs Tiempo . . . . . 109

7.29. Frente de pareto de Rugosidad vs Tiempo vs MRR . . . . . 110

7.30. Valores usados para los parámetros del cúmulo de partículas . . . . . 111

7.31. Conjunto de pareto . . . . . 111

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Antecedentes del proyecto

Como resultado del mercado global y de los grandes y constantes cambios en los requerimientos, necesidades y deseos de los clientes, las industrias manufactureras han visto la necesidad de encontrar nuevas técnicas que les permitan ser competitivos en el mercado y les permitan así mismo adaptarse rápida y fácilmente a los cambios y nuevos desafíos tecnológicos. En consecuencia las empresas requieren reducir los tiempos de desarrollo de sus productos. Para considerar a una compañía como de alta eficiencia, se requiere que tenga tiempos reducidos de acceso a los mercados, cumpliendo todas las expectativas y restricciones demandadas por los clientes incluyendo calidad, innovación, así como el costo competitivo [Nag]. Es prioritario no centrar los esfuerzos en el diseño de la pieza, sino en el diseño del proceso productivo con la finalidad de lograr la eficiencia para responder a los cambios necesarios para optimizar el tiempo que tome el desarrollo del producto. Esto lleva a la necesidad de acortar el ciclo de tiempo entre el diseño de producto y el proceso de producción generando un área de oportunidad en las empresas para investigar en el uso de las nuevas tecnologías y procedimientos de diseño y manufactura. Dentro del proceso productivo en la industria manufacturera el maquinado de productos, es una parte crítica. En estos procesos se generan la geometría requerida de la pieza removiendo material a través de una herramienta de corte, con ello se tiene una deformación local llevada hasta

fracturar el material con el movimiento de la herramienta y la pieza de trabajo [Pra08], la gran ventaja del proceso de maquinado con respecto a otros se encuentra en su capacidad de generar tolerancias precisas sin modificar las propiedades físicas del material, a diferencia de otros procesos de manufactura que pueden ser en frío o en caliente [Rao06].

Casi el 80 % de las piezas manufacturadas tienen en sus procesos algún maquinado, y aproximadamente el 75 % de ellos está cubierto por procesos como el torneado, taladrado, fresado y esmerilado [Per06]. La adecuada combinación de los parámetros de corte es de vital importancia al momento de maquinar un producto. Actualmente la experiencia de la persona que maneja la máquina de corte juega un papel primordial en la selección de parámetros de proceso, pero resulta difícil medir y optimizar la experiencia del operador. Las aleaciones de titanio han sido usadas principalmente en la industria aeroespacial, química y petrolera, debido a la resistencia a la fractura, esfuerzos y a la corrosión. Éste es un material con mala maquinabilidad debido a las siguientes características; baja conductividad térmica y alta reacción química con otros materiales [Hon03]. Un material con buena maquinabilidad generará menor fuerza de corte, menor valor de rugosidad, maximizará la velocidad de remoción de material, lo cual lleva a que con este material se utilicen condiciones de corte mínimas. Las bajas velocidades de corte usadas con herramientas de carburo sinterizado dan como resultado una baja productividad [Ulu11], por lo que mejorar las variables de maquinado es una tarea que ayuda a obtener una superficie de maquinado menos rugosa [Hei07], logrando con ello la optimización del proceso. El proceso puede ser complejo, y requiere de una buena economía, ya que para ser rentable debe existir un balance adecuado entre costos de producción y rendimiento de producción. En algunas compañías se busca reducir costos e incrementar la vida de las herramientas por medio de esmerilado o retrabajo para prolongar su vida útil, pero puede ser contraproducente, ya que se tiene que dedicar personal a tratar de concatenar las herramientas en lugar de producir. Por esta razón es importante encontrar el desempeño óptimo de las herramientas buscando emplear de manera adecuada y eficiente. Además

del costo de la herramienta existen otros costos generados para el cambio de las mismas y paros de máquinas por estos motivos. Por otra parte, el utilizar la herramienta a velocidades pequeñas para tratar de conservar su filo, tampoco es rentable, ya que la estrategia de una producción conservadora puede ahorrar dinero en herramental, pero cualquier ahorro puede perderse con una baja producción. Aunado a lo anterior existen diversas problemáticas involucradas en el proceso de maquinado de las cuales se puede destacar: la importancia de contar con modelos para optimizar las variables considerando tiempos, temperaturas, velocidades, etc. que permitan establecer una relación de respuesta a la calidad del producto, pero por la complejidad del proceso, pueden existir variables cualitativas y cuantitativas, continuas y discontinuas, lo cual vuelve la optimización una tarea difícil con múltiples criterios de selección y limitaciones. Un aspecto de vital importancia es la identificación de los parámetros de entrada al modelo, si se busca maximizarlos minimizarlos con el fin de optimizar la salida deseada. En la búsqueda por optimizar los procesos de manufactura, muchos han sido los temas investigados y a desarrollar, siendo las más utilizadas las relacionadas al costo, tiempo, vida útil de herramienta, [Mol02] [Sar03], sin embargo han empleado sólo un objetivo de estudio, lo que le da una limitación en los resultados obtenidos debido a la complejidad del proceso de maquinado. Por otro lado se han hecho estudios multiobjetivos involucrando a otros materiales con maquinabilidad buena y menor costo como lo es el titanio. Para el caso de éste último, los estudios que se han realizado involucran herramientas estadísticas donde sólo se varían condiciones de corte como velocidad, avance y profundidad [Ram07]. Los problemas de optimización que tienen más de una función objetivo son cada vez más comunes en todas las áreas de conocimiento. En tales problemas, los objetivos a optimizarse son opuestos uno respecto al otro, lo que significa que no existe alguna solución sencilla para estos problemas. En esta tesis se propone evaluar a través de herramientas de cúmulo de partículas funciones objetivo encontradas en el proceso de maquinado del Titanio 6Al 4V que permitan analizar diferentes parámetros a través de funciones agregadas en una sola función, para

obtener un grupo de soluciones no dominadas y encontrar el mejor grupo de soluciones que represente soluciones entre los objetivos, dentro de las cuales se selecciona la más conveniente según los requerimientos específicos. Todas estas soluciones son consideradas óptimas dentro del espacio de búsqueda analizado.



# Capítulo 2

## Planteamiento del problema

### 2.1. Descripción del problema

#### 2.1.1. Antecedentes de la planta

Parte de Frisa Forjados S.A. de C.V., Frisa División Aerospace se creó en el 2003 como un acuerdo entre Frisa Forjados S.A. de C.V. y Wyman Gordon Inc. Esta empresa fue fundada para fabricar anillos sin costura base níquel capaces de soportar altas temperaturas y altamente resistentes a la corrosión como son los anillos rolados usados en la industria aeroespacial y en la industria de generación de energía. Otros productos son anillos fabricados con aceros inoxidable y aleaciones base titanio.

La compañía se divide en 4 principales departamentos mostrados en la Figura 2.1: Forja y rolado, tratamiento térmico, laboratorio y maquinado.

#### 2.1.2. Descripción de la Problemática de FRISA Forjados S.A. de C.V.

Frisa Forjados S.A. de C.V., que es una compañía líder mundial en la elaboración de anillos sin costura. Algunos productos son fabricados con materiales de baja maquinabilidad, tales como aleaciones base níquel, aleaciones base titanio, debido a las altas temperaturas generadas entre la cara de la herramienta y la rebaba al momento de arrancar el material. Frisa Aerospace tiene la necesidad de investigar métodos y tecnologías exis-



Figura 2.1: Departamentos de FRISA Forjados S.A. de C.V.

tentes para el desarrollo e innovación de procesos de manufactura con el fin de adoptarlos, adecuarlos o desarrollarlos de acuerdo a sus necesidades.

Frisa tiene procesos de manufactura que permiten fabricar componentes de diversa complejidad, esto es, cuenta con equipo de punta, personal altamente preparado e instalaciones óptimas, sin embargo, no existen estudios profundos que respalden y validen las prácticas de producción, especialmente de maquinado que se llevan a cabo, debido a restricciones productivas.

Algunas aleaciones para fabricar componentes son base titanio y juegan un papel importante en la industria aeroespacial. Sin embargo tienen un costo elevado, ya que cada kilo de material fluctúa entre \$40 y \$60 USD, lo cual provoca que el proceso de eliminación de material sea complicado. La compañía en la actualidad, remueve el 60 % del material que compone la materia prima y cada 5 minutos realizan cambio de herramienta. esto se determinó por una prueba que realizaron en el material dejando que la herramienta se desgaste hasta fracturarse, midiendo el tiempo y calculando el rendimiento que puede tener la misma el resto del tiempo.

El análisis de los procesos de maquinado de Frisa División Aerospace, es con el fin de complementar el uso de métodos\_ herramientas modernas en los sistemas de producción, que permitan parámetros de operación, que reduzcan el tiempo de fabricación y mejoren la calidad de los componentes fabricados, ayudando a mejorar su competitividad.

## 2.2. Preguntas de investigación

¿Es posible optimizar el proceso de maquinado considerando parámetros de entrada tales como velocidad, avance, profundidad de corte, tipo de herramienta, lubricante y analizando la temperatura, rugosidad y vibración?

¿El cúmulo de partículas ayudará a identificar el rango donde se intercepten un grupo de parámetros de maquinado para mejorar el proceso incluyendo un análisis multiobjetivo en el proceso de elaboración de piezas con titanio?

## 2.3. Hipótesis

La estimación de parámetros de corte y la predicción de rugosidad, tiempo, desplazamiento, velocidad de remoción de material y temperatura con redes neuronales, servirá como función objetivo (de funciones ponderadas a través de pesos) para la formación de la aproximación del frente de pareto con uso de algoritmo de cúmulo de partículas, a través de la selección y permitirá mejorar el proceso de fabricación e incrementar la vida de la herramienta de corte empleada, en un proceso de fresado de alta velocidad, en las aleaciones de Titanio 6Al 4V considerando reunir parámetros de máquina, herramental y condiciones de corte.

## 2.4. Objetivos

### 2.4.1. Objetivo General

Diseño y desarrollo de una metodología empleando un sistema inteligente utilizando redes neuronales y cúmulo de partículas con el fin de identificar los parámetros envueltos en un proceso de maquinado, para garantizar la correcta elaboración de la pieza.

### 2.4.2. Objetivos Específicos

Desarrollar un diseño de experimentos que permita la correlación de las variables más significativas simultáneamente y obtener la influencia de ellas en el proceso de fresado del titanio 6Al 4V en un centro de maquinado de alta velocidad.

Determinar la técnica más adecuada que ayude a generar un sistema inteligente que permita obtener los mejores parámetros de maquinado para la producción de un componente aeronáutico en un centro de maquinado.

Definir las variables de entrada que ayuden a la producción, con las condiciones ideales de maquinado para generar una pieza con la calidad y acabado deseados.

Estandarizar el conocimiento del comportamiento de las Aleaciones de Titanio 6Al-4V

al ser maquinadas bajo diferentes condiciones y parámetros.

Materializar la capacidad tecnológica y experiencia del personal existente en la planta de manufactura de FRISA AEROSPACE por medio de la generación de un sistema inteligente que mejore el maquinado de aleaciones de Titanio.

## 2.5. Justificación

La industria metalmecánica se caracteriza por el constante cambio que presenta en los procesos de manufactura. El aumento de la personalización de los productos así como la incorporación de nuevos materiales en la manufactura de productos y componentes ha propiciado que se tengan procesos cada vez más robustos. La automatización del diseño y producción es el común en empresas de alto nivel. [Rao06].

Paralelo a la automatización es importante identificar cómo la industria manufacturera requiere que sus procesos productivos cada vez sean más competitivos. Ésto sólo se logró con la integración del conocimiento en sus diversas áreas, como lo son el diseño y la productividad de la maquinaria. Para lograr esto es necesario el desarrollo de nuevas tecnologías que permitan llegar a la optimización, como lo son los sistemas inteligentes, con los cuales se pueden lograr resultados de alto nivel.

Si se tienen varios materiales de los cuales todos satisfacen el diseño y las propiedades mecánicas requeridas para un producto, el criterio principal de selección será su maquinabilidad, en otras palabras, su desempeño operacional durante el maquinado. Existe una necesidad industrial y científica para desarrollar un procedimiento simple, sistemático, lógico y conveniente que permita evaluar la maquinabilidad de sus materiales de trabajo de manera eficiente y efectiva [Rao06].

FRISA División Aerospace dentro de su proceso productivo, se caracteriza por manufacturar una diversidad de anillos y piezas forjadas, es decir una producción intermitente y ello involucra que sea complicado llegar a tener un sistema de fabricación controlado, por lo que es necesario optimizar la productividad de la maquinaria. Ésto se logra al analizar

las variables de entrada a la misma, con lo cual se podrá generar la experiencia que permita que la parte sea obtenida en sus condiciones óptimas, un mejor resultado puede obtenerse si dichas variables se apoyan en un sistema inteligente que integre el conocimiento en el proceso productivo y generar una metodología que permita que la mejora continua y que los sistemas productivos sean capaces de reaccionar a esta tendencia.

Para la industria aeroespacial es de suma importancia la realización de sus productos de manera eficaz, por lo que existe la preocupación por mejorar las variables envueltas en el proceso de maquinado de tal manera que se pueda garantizar la eficiencia de los productos principalmente al considerar aleaciones que tienen baja maquinabilidad y un elevado costo inicial.

El material que se estudiará en esta tesis es el titanio 6Al 4V, que es un material liviano, con buenas propiedades mecánicas y buena resistencia a la corrosión. Una desventaja es que tiene pobres propiedades térmicas lo cual lo cataloga como un material difícil de maquinar. Sus aplicaciones son en la industria aeroespacial y militar, así como en la médica, siendo de vital importancia el proceso de maquinado y componentes fabricados con esta aleación, ya que envuelven precisión y se requiere que el proceso sea productivo en pequeños volúmenes de producción. Los rangos en que se trabaja la velocidad de corte y el avance son limitados para considerar vidas de herramientas satisfactorias. Aunado a ésto la herramienta, recubrimientos y geometría de la misma influyen en la productividad, ya que se puede presentar desgaste excesivo de herramienta lo cual puede producir errores en las tolerancias de las parte. También es conveniente conocer el grado de aportación que tiene la vibración generada en el husillo de la herramienta y la temperatura obtenida por la fricción de la pieza con la herramienta y a fin de controlarlo para tener un proceso productivo robusto y satisfactorio en cuanto a tiempo de elaboración y calidad de los productos.

Este trabajo permitirá a las empresas manufactureras aeronáuticas así como automotrices, evaluar sus materiales de trabajo, mejorar la productividad, minimizar el tiempo

de producción e incrementar la eficiencia de los procesos de maquinado. La importancia de esta investigación en la ciencia, consiste en obtener la relación que existe en las variables de maquinado y mejorarla a través del uso de sistemas inteligentes como las redes neuronales para predicción y la optimización a través del cúmulo de partículas.

## **2.6. Limitación de la tesis**

### **2.6.1. Delimitación**

Esta tesis está enfocada en el proceso de fresado de alta velocidad, en una centro de maquinado vertical Bridgeport VMC 760, con el uso de herramienta endmil de alonitruro de titanio, variando velocidades de avance, giro, profundidad de corte, cambio de diámetro de herramienta, cantidad de filos involucrados en el corte, con un sistema de sujeción CAT 45 y el proceso en seco, así como el uso de lubricante, para obtener rugosidad, temperatura y desplazamiento al momento de cortar. El desgaste y la vida de herramienta no se consideran dentro de los criterios de maquinabilidad y por lo tanto su análisis está fuera del objetivo de esta tesis.

### **2.6.2. Resultados e Impactos Esperados**

#### **Impactos Tecno-científicos**

- Desarrollar una metodología que ayude a realizar un sistema inteligente de los parámetros necesarios en el proceso de maquinado.
- Realizar un diseño de experimentos que permita la adquisición de múltiples variables simultáneamente, para realizar pruebas de maquinabilidad del titanio 6Al-4V.
- Optimización de los procesos de maquinado dentro de una celda de manufactura de maquinado de anillos de Titanio 6Al-4V que contribuya a mejorar procesos productivos.

- Aseguramiento de la calidad del producto sin importar la cantidad de piezas a producir y la experiencia que se tenga en el desarrollo del mismo.
- Fomentar la investigación a través de la asistencia técnica en la industria.
- Generar nuevos conocimientos, técnicas y/o metodologías para el fortalecimiento de los procesos de manufactura en la industria.
- Contribuir al fortalecimiento de las actividades de investigación aplicada y desarrollo tecnológico.
- Fomentar la participación de personal académico y de estudiantes de las áreas de ingeniería industrial y afines.
- Participación del sector privado en el desarrollo científico.
- Reducción de tiempo de arranque de proyectos en las empresas relacionadas con proceso de maquinado.
- Disminución del costo de producción con lo cual la industria manufacturera del país será más competitiva a nivel internacional.
- Fomentar la inversión del sector privado para la generación de fuentes de trabajo en la región.
- Incrementar los apoyos de la comunidad industrial a la sociedad.

## 2.7. Estructura de la tesis

Capítulo 1. Muestra una introducción de los antecedentes del proyecto, y la revisión literaria del material a analizar así como las herramientas que se utilizan para analizarlo.

Capítulo 2. En él se observan cómo está estructurada la tesis, qué la sustenta, a raíz de dónde surge la inquietud de estudiar este material y colaborar con las compañías



manufactureras de la región norte de México para corregir problemas reales y que no cuentan con el tiempo necesario para realizar pruebas, ya que sus máquinas se encuentran saturadas en producción, además de los objetivos y las limitaciones consideradas en este trabajo.

Capítulo 3. Este capítulo presenta una síntesis de investigaciones semejantes a ésta en donde se muestran los diferentes métodos utilizados para la evaluación del material titanio 6Al-4V que es el objeto de estudio de esta tesis, así como los sistemas inteligentes que es la herramienta que se utilizó para el análisis de los datos encontrados en la investigación.

Capítulo 4. En este capítulo se muestra una introducción de los temas esenciales en esta tesis, el maquinado y las fórmulas para calcular sus velocidades, los conceptos de rugosidad, temperatura y los que envuelve el cúmulo de partículas que es el enfoque central de dicho trabajo

Capítulo 5. En este capítulo se muestran los análisis previos realizados para la generación de conocimiento respecto al proceso y al material para poder generar la metodología de investigación a seguir, la cual es detallada en este capítulo.

Capítulo 6. Este capítulo presenta los métodos que fueron utilizados para probar y validar las hipótesis, el equipo que se utilizó para medir, el material que utilizó, la forma de medición de los datos y el plan experimental que se siguió.

Capítulo 7. En este capítulo se reportan y se discuten los resultados de los experimentos incluyendo los datos adquiridos, los análisis con regresión, la red neuronal y los resultados de las gráficas de cúmulo de partículas.

# Capítulo 3

## Revisión bibliográfica

### 3.1. Revisión literaria del Titanio

El papel que juega el titanio dentro de los metales es considerado en la posición número 4, con respecto a su abundancia en la naturaleza y el noveno en la superficie terrestre como metal industrial. Usualmente no se puede encontrar en estado puro, la manera de encontrarlo es a través de óxidos, en ciertos componentes de hierro como escoria y en fósiles de plantas o animales. El uso de este metal se ha extendido en productos de alto valor agregado especialmente en la industria aeroespacial, debido a sus propiedades mecánicas, peso liviano y resistencia al ataque de ácidos, por lo que la industria química lo considera de gran valor; también es un material importante para la realización de prótesis o implantes humanos, por sus propiedades biocompatibles, (los tejidos del organismo soportan su presencia).

Existen muchas aleaciones de titanio comercial, estas se clasifican según el grado que tienen, siendo las más comunes:

- **Ti grado 2.-** Titanio puro comercial, con la composición química: Ti Fe (0,25-0,30). Su límite elástico de 275 MPa, también tiene resistencia a la tracción de 345 MPa, una ductilidad del 20 % una dureza de 82 HRB. Es excelente para soldadura y una resistencia eléctrica de 0,56 ( $\mu\Omega\text{m}$ ). Sus principales características son la resistencia

a la corrosión, por lo que su aplicación es en tuberías, intercambiadores de calor, etc.

- **Ti grado 5.-** Su composición química es similar al Ti 6Al-4V. La resistencia a la tracción típica es de 896 MPa, con una ductilidad del 10 %, una dureza de 33 HRB y un límite elástico de 827 MPa. En el ámbito mecánico, la soldabilidad es buena y presenta alta resistividad eléctrica de 1,67 ( $\mu\Omega\text{m}$ ). Sus principales características son alta resistencia mecánica y resistencia a altas temperaturas, por lo que se usa para la realización de tornillería y piezas forjadas.
- **Ti grado 19.-** Su composición química es Ti-3Al-8V-6Cr-4Zr-4Mo (Beta-C). La resistencia a la tracción típica es de 793 MPa, cuenta con un límite elástico de 759 MPa, tiene una dureza de 45 HRB y una ductilidad de 15 % . Tiene una soldabilidad regular y una resistividad de 1,55( $\mu\Omega\text{m}$ ). Sus características están enfocadas a alta resistencia a la temperatura y corrosión, por lo que se aplica en el ensamble de motores aeronáuticos y navales.
- **Ti6246.-** Su composición química es Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo. Tiene un límite elástico de 1103 MPa, una resistencia a la tracción de 1172 MPa, una ductilidad del 10 %, una dureza de 39 HRB. Su soldabilidad es limitada y tiene una resistividad eléctrica de 2 ( $\mu\Omega\text{m}$ ). Sus usos principales incluyen alta resistencia mecánica, la cual obtiene por enfriamiento drástico.

El titanio es ligado a múltiples procesos productivos, entre los cuales destacan:

- **Fundición.-** Este proceso en piezas de titanio se lleva a cabo cuando la pieza a realizar tiene un diseño complejo que hace difícil el forjarla o el maquinarla. Existen muchas aplicaciones donde se emplean piezas fundidas en diferentes tamaños desde piezas pequeñas como las usadas en la industria biomédica hasta componentes de peso superior a los 200 kg. En fundición se consideran dos como las principales

formas de realizar piezas: la primera es fundición por moldeo de grafito apisonado, usada en el vaciado de piezas de gran tamaño, ya que es un proceso económico y que no requiere de moldes especiales. La segunda forma de fundición es por cera perdida, usada para piezas pequeñas y que requieren de una precisión superior, es decir, que necesitan acabados de alta calidad.

- **Forja.-** Para la realización de componentes de titanio por este método se emplean estrategias similares que para realizar forjado del acero. Por ejemplo para el forjado en caliente se deben controlar parámetros como la temperatura con la cual se trabaja, para controlar la estructura de la pieza y sus propiedades. La deformación es más probable en caliente si se trabaja a una temperatura superior a la transformación alotrópica.
- **Soldadura.-** La soldadura de piezas de titanio, incluye controlar la temperatura del proceso debido al riesgo de transformación de fase que puede promover una pérdida en la ductilidad y la resistencia mecánica del material.
- **Extrusión.-** Consiste en formar un material haciéndolo pasar por un orificio con una figura determinada. El titanio y sus aleaciones, como muchos otros materiales, permiten su extrusión, para producir diversos perfiles tanto para manejo en bruto como para acabados finales. La extrusión es recomendable para la producción de piezas largas y de sección compleja.
- **Troquelado.-** Es una técnica de moldeo de metales en caliente que permite fabricar piezas complejas en una sola operación con la acción conjunta de una prensa y un molde o troquel adecuado a la pieza a fabricar. Es indispensable que el material tenga la propiedad de poder alcanzar una adecuada elongación. Esta propiedad es alcanzada en el titanio en la aleación grado 5 Ti 6Al-4V. La técnica consiste en colocar la pieza a moldear entre las dos mitades del troquel o molde, a la temperatura que permita la mejor súper-plasticidad del material.

- **Maquinado.-** El maquinado del titanio en máquinas herramientas convencionales se realiza en condiciones parecidas a las que se emplean para el acero inoxidable o las aleaciones de aluminio, y las mismas que dependerán de la dureza que tenga la aleación. El titanio tiene un módulo de elasticidad menor que el del acero, lo que le da mayor elasticidad a las piezas y con ello pueden tender a flexionarse. Es necesario el uso de un refrigerante adecuado, considerando que el titanio es un mal conductor térmico que limita la extracción de calor durante su maquinado, lo cual produce un deterioro en el filo de corte de las herramientas como resultado de las altas temperaturas en la zona de corte.

Finalmente, debe ser mencionado que la industria espacial y aeronáutica utiliza este material debido a su baja densidad, alta resistencia y su capacidad de soportar diferentes ambientes corrosivos, las aleaciones de titanio se emplean en aviones y cohetes espaciales, básicamente para construir forjados estructurales de los aviones, discos de ventilación, álabes de turbinas, carcasas, etc.

## 3.2. Revisión literaria de sistemas inteligentes

La optimización e identificación de las variables que se ven envueltas en un proceso de realización de un producto no es una tarea sencilla. Se considera que integrando el conocimiento de gente experta a estas tareas, es posible tener mejores resultados, la tendencia mundial para lograr este objetivo, ha sido el adaptar sistemas inteligentes que sean capaces de desarrollar la habilidad de aprender de estos expertos y mejorarlos. Los sistemas inteligentes o expertos y la inteligencia artificial (IA) empleados en el desarrollo de nuevos productos y en la optimización de procesos de manufactura, es una área que ha experimentado un gran crecimiento en los últimos años y las compañías manufactureras han encontrado en ella una clave para incrementar su competitividad, reduciendo costos y tiempos de desarrollo en sus procesos. Un mal diseño de un producto o una mala producción, provoca una gran cantidad de problemas y posibles retrabajos a realizar en las

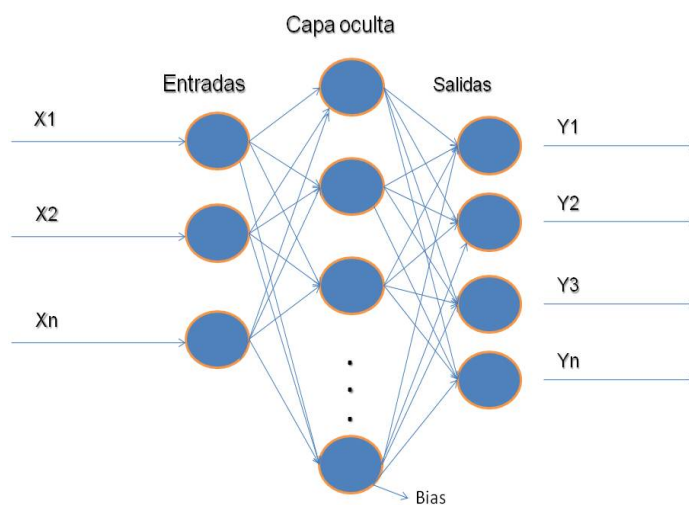


Figura 3.1: Estructura básica de una red neuronal

áreas de producción, lo cual hace que los costos se incrementen y provoca atrasos en los tiempos de entrega del producto a los clientes. [Esc08]

El uso de métodos tradicionales para la solución de problemas de identificación y optimización de variables involucradas en el proceso de maquinado de un componente, no necesariamente cumple las necesidades del crecimiento en la industria actual. Algunos autores proponen técnicas de inteligencia artificial para resolver esta problemática, siendo algunas de ellas: redes neuronales, lógica difusa, algoritmos genéticos. [Esc11].

### 3.3. Redes Neuronales Artificiales

Las redes neuronales artificiales son sistemas que tienen un número de elementos agrupados en capas y que están interconectados entre sí, ver Figura 3.1, los cuales se entrenarán para reaccionar de alguna forma deseada a un estímulo dado en la capa de entrada. Estas estructuras pueden poseer varias entradas y salidas. [Esc11].

Estos sistemas son semejantes al cerebro humano de alguna forma. El primer punto

dentro de los requisitos de la red es aprender a comportarse y alguien debe encargarse de enseñarles, lo cual se denomina entrenamiento basado en un conocimiento adquirido con anterioridad del problema. La habilidad de aprendizaje es una de las características más importantes de las redes neuronales, además ellas pueden modificar su comportamiento según el medio ambiente, lo cual se denomina autoajuste, produciendo respuestas consistentes. Existen diversas formas de algoritmos de aprendizaje que pueden emplearse en las redes neuronales. Una vez entrenada la red es un sistema robusto, ya que tiene un cierto grado de insensibilidad a variaciones pequeñas en entradas.

### 3.3.1. Optimización de Cúmulo de Partículas (OCP)

La Optimización de Cúmulo de Partículas (OCP) es una técnica de búsqueda heurística que simula los movimientos de un grupo de pájaros que apuntan para encontrar alimento. [Esc11]. La simplicidad relativa de la OCP y el hecho de que es una técnica con base en población lo ha hecho un candidato natural para la optimización multi-objetivo.

La primera extensión de la estrategia de OCP para resolver problemas multi-objetivos fue propuesto en 1999. [Moo99]

Para resolver problemas de minimización donde  $\vec{f}(\vec{x}) = [f_1(\vec{x}), f_2(\vec{x}), \dots, f_k(\vec{x})]$  sujeto a:  $g_i(\vec{x}) \leq 0$   $i = 1, 2, \dots, m$  y a  $h_i(\vec{x}) \leq 0$   $i = 1, 2, \dots, p$  donde  $\vec{x} = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$  es el vector de variables de decisión,  $f_i : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ ,  $i = 1, \dots, k$  son las funciones objetivo y  $g_i, h_j : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ ,  $i = 1, \dots, m$   $j = 1, \dots, p$  son las funciones de restricción del problema. [Esc08].

Ademas es importante considerar lo siguiente

1. Dados 2 vectores  $\vec{x}, \vec{y} \in \mathbb{R}^k$  se sabe que  $\vec{x} \leq \vec{y}$  si  $x_i \leq y_i$  para  $i = 1, \dots, k$  y que  $\vec{x}$  domina  $\vec{y}$  denotado por  $\vec{x} \prec \vec{y}$  si  $\vec{x} \leq \vec{y}$  y  $\vec{x} \neq \vec{y}$ . En la Figura 3.2 se puede ver la relación de dominancia en la presencia de 2 funciones objetivo.
2. El vector de las variables de decisión  $\vec{x} \in X \subset \mathbb{R}^n$  es no dominada con respecto a  $X$ , si no existe otro  $\vec{x}' \in X$  dado que  $(\vec{f})(\vec{x}') \prec (\vec{f})(\vec{x})$ .

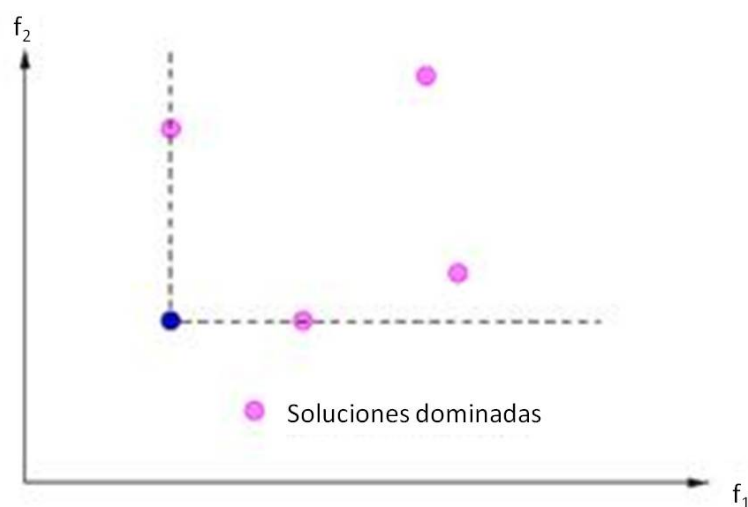


Figura 3.2: Relación de dominancia en un espacio de 2 dimensiones (bi-objetivo)

3. El vector de variables de decisión  $(\vec{x}^*) \in \mathcal{F} \subset \mathbb{R}^n$  ( $\mathcal{F}$  es una región factible) es el pareto óptimo si es no dominado respecto a  $\mathcal{F}$ .
4. El grupo de pareto óptimo  $\mathcal{P}^*$  está definido por  $\mathcal{P}^* = \{\vec{x} \in \mathcal{F} \mid \vec{x} \text{ más el pareto óptimo}\}$
5. El frente de pareto  $\mathcal{PF}^*$  es definido por  $\mathcal{PF}^* = \{\vec{f}(\vec{x}) \in \mathbb{R}^k \mid \vec{x} \in \mathcal{P}^*\}$  como se muestra en la Figura 3.3

La OCP es un algoritmo para la optimización basado en población en la simulación del comportamiento social de pájaros dentro de un grupo. Aunque originalmente adoptado para balancear pesos en redes neuronales, la OCP se convirtió en un optimizador global muy popular, principalmente en problemas en que las variables de decisión son números reales [Eng02] [Ken95]. Es posible considerar dos distinciones principales entre la OCP y un algoritmo evolutivo [Ang98].



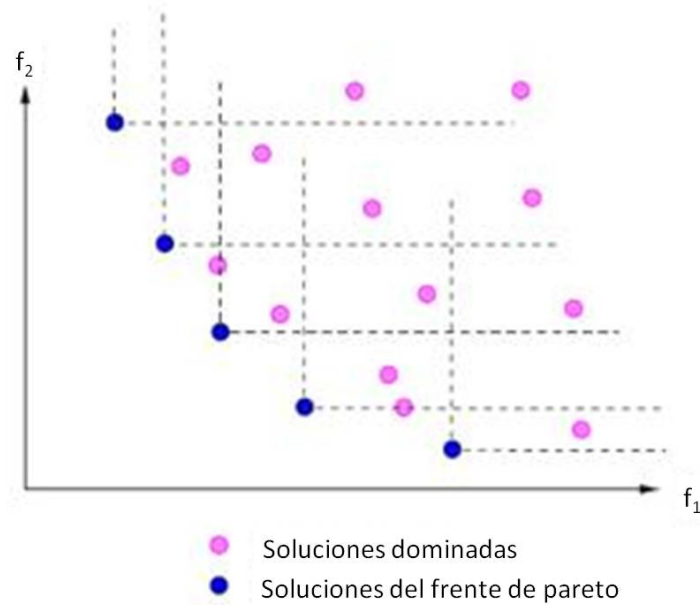


Figura 3.3: Frente de Pareto con un grupo de soluciones para un espacio de 2 objetivos

1. Los algoritmos evolutivos dependen de tres mecanismos en su proceso: formación de la matriz, selección de individuos y la afinación fina de sus parámetros. En cambio, la OCP depende sólo de dos mecanismos, entonces la OCP no adopta una función de selección explícita. La ausencia de un mecanismo de selección en la OCP es compensada por el uso de conductores para guiar la búsqueda. Sin embargo, no existe ninguna noción de la generación de descendencia en la OCP como con algoritmos evolutivos.
2. Una segunda diferencia entre los algoritmos evolutivos y la OCP está relacionada con la vía en que los individuos son manipulados. La OCP usa un operador que considera la velocidad de una partícula en una dirección particular. Esto puede ser visto como un operador de mutación direccional en que la dirección es definida por el mejor valor personal de ambas partícula y el mejor valor global (del enjambre). Si la dirección del mejor valor personal es similar a la dirección del mejor global, el ángulo de direcciones potenciales será pequeño, mientras que un ángulo más

grande proporcionará un intervalo mayor de la exploración. Por otro lado, los algoritmos evolutivos utilizan operadores de mutación que puede poner a un individuo en cualquiera dirección.

Dos aspectos importantes mediante los cuales la OCP tiende a volverse popular son:

1. El algoritmo principal de la OCP es relativamente simple y su ejecución es directa.
2. La OCP ha encontrado ser muy efectivo en una variedad amplia de aplicaciones, y capaz de producir buenos resultados a costos computacionales bajos [Eng05] [Ken01].

En la siguiente lista se presentan definiciones de términos técnicos comúnmente utilizados en la OCP:

- Enjambre: La población de un algoritmo.
- Partícula: El miembro (individuo) de un enjambre. Cada partícula representa una solución potencial para que el problema sea resuelto. La posición de una partícula es determinada por la solución.
- pbest(mejor personal): Posición mejor personal de una partícula dada hasta ahora, es decir, la posición de la partícula que provee el máximo éxito.
- lbest (mejor local): La posición del mejor miembro de partícula de la vecindad de una partícula dada.
- gbest (mejor global): La posición de la mejor partícula del enjambre entero.
- Líder: La partícula que comúnmente guía a otras partículas hacia mejores regiones del espacio de búsqueda.
- La velocidad (vector): Este vector maneja el proceso de optimización, es decir, determina la dirección en que una partícula necesita moverse a fin de mejorar su posición actual.

- **Peso de inercia:** Denotado por  $W$ , el peso de inercia es empleado para controlar el impacto de las velocidades previas en la velocidad actual de una partícula dada.
- **Factor de aprendizaje:** Representa la atracción que una partícula tiene hacia su propio éxito o al de sus vecinos. Son dos los factores de aprendizaje a utilizarse:  $C_1$  y  $C_2$ .  $C_1$  es el aprendizaje cognoscitivo y representa la atracción que una partícula tiene hacia su propio éxito.  $C_2$  es el aprendizaje social y representa la atracción que una partícula tiene hacia el éxito de sus vecinos. Ambos,  $C_1$  y  $C_2$ , normalmente son definidos como constantes.
- **Topología de vecindad:** Determina el conjunto de partículas que contribuyen al cálculo del valor de  $lbest$  de una partícula dada. En la OCP, las partículas son exaltadas completamente en el espacio hiper-dimensional de búsqueda. Cambios a la posición de las partículas dentro del espacio de búsqueda son basados en la tendencia psicológica social de individuos para emular el éxito de otros individuos.

La posición de cada partícula cambia según su propia experiencia y la de sus vecinos.

El eje  $\vec{x}_i(t)$  denota la posición de la particular  $p_i$ , a un tiempo  $t$ . La posición de  $p_i$  cambia añadiendo una velocidad  $\vec{v}_i(t)$  a la posición actual, usando la Ecuación 3.1

$$\vec{x}_i(t) = \vec{x}_i(t-1) + \vec{v}_i(t) \quad (3.1)$$

El vector de velocidad refleja la información cambiada la sociedad y, por lo general, está definido por la siguiente Ecuación 3.2:

$$\vec{v}_i(t) = W\vec{v}_i(t-1) + C_1r_1(\vec{x}lbest_i - \vec{x}_i(t)) + C_2r_2(\vec{x}gbest_i - \vec{x}_i(t)) \quad (3.2)$$

Donde:  $W$  = es el peso de Inercia  $\vec{v}_i(t-1)$  = es la velocidad anterior  $C_1$  y  $C_2$  = son factores de aprendizaje  $r_1$  y  $r_2$  = son valores aleatorios

### 3.4. Estado del arte para el maquinado del Ti 6Al-4V

Análisis experimentales de corte ortogonal en el Ti 6Al-4V han sido planteados [Mol02]. Los intervalos de velocidades de corte utilizados en dichos análisis fueron de 0.01 a 73 m/s usando una máquina universal de alta velocidad. La evolución de las fuerzas de corte en términos de velocidad de corte y la formación de bandas adiabáticas han sido analizadas en este estudio. Realizando micrografías se determinó el ancho y la distancia entre bandas. Se reportó que los resultados dependen de las velocidades analizadas, por lo que propone un modelado donde considera la dependencia a la velocidad.

Se ha investigado el maquinado de alta velocidad en aleaciones de titanio. [Su2]. Las temperaturas elevadas generadas en la zona de corte disminuyen la vida de la herramienta, por lo que para mejorarla ha propuesto la dependencia a los refrigerante\lubricante. La herramienta utilizada en un fresado de alta velocidad generalmente es carburo cementado y se han probado varios tipos de refrigerante hasta encontrar el más adecuado para mejorar las condiciones de vida de la herramienta. Las pruebas han incluido el maquinado en seco, con fluido de refrigerante, con gas de nitrógeno comprimido (CCNG) a 0 y -10°C, con comprimido de nitrógeno frío y niebla de aceite (CCNGOM). Analizar mediante el microscopio electrónico de barrido (SEM) los desgastes y fallas de las herramientas, se ha encontrado al desgaste de flanco como el punto más recurrente en el análisis, la excesiva rebaba en el ángulo de corte y fractura de la cara.

Estudio donde se comparan las fuerzas de corte generadas en el maquinado de alta velocidad de las aleaciones de Ti 6Al-4V y aleación 718 también han sido realizados [Fan08]. Dichos estudios consistieron en medir las fuerzas de corte en dos dimensiones utilizando probetas tubulares. Se evaluaron 5 velocidades de corte y 4 valores de avance, utilizando condiciones y montajes experimentales similares. Se realizaron 12 regresiones empíricas estableciendo relaciones entre fuerzas de corte, fuerzas de avance y la tasa de fuerzas. Se concluye que bajo las mismas condiciones la fuerza de corte y fuerza de avance de la aleación 718 son mayores que las fuerzas utilizadas para el Ti 6Al-4V.

Otras evaluaciones comparan la maquinabilidad de las aleaciones de titanio Ti 6Al-4V y Ti555.3 utilizadas para aplicaciones aeroespaciales. Analizando las fuerzas de corte, la morfología de la viruta y el desgaste de la herramienta, el experimento altera la velocidad de corte en un intervalo de 40 a 90 m/min. Este criterio se basa en la norma ISO 3685 en donde el final de vida de herramienta se alcanza cuando el desgaste de flanco alcanza una longitud de 0.3 mm para 15 minutos de tiempo de corte. Se analizaron las fuerzas de corte y las fuerzas de avance específicas. Los resultados muestran una mejor maquinabilidad para el Ti 6Al-4V que para la aleación Ti555.3, ya que presenta menores fuerzas específicas de corte y menor tasa de desgaste para la herramienta. Sin embargo en ambas aleaciones se presentaron virutas con bandas de corte adiabáticas. [Arr08]

Un estudio de rugosidad en el torneado en seco de barras de Al-Cu AA2024, utilizadas en aplicaciones aeroespaciales, donde se varía la velocidad de corte de 43 a 170 m/min y el avance de 0.05 a 0.3 mm/rev dejando la profundidad de corte constante y se miden los parámetros Ra (Es la media aritmética de los valores absolutos de las separaciones y del perfil rugoso de la línea media dentro del tramo de medida) y Rz (es la media de los valores absolutos de las cinco crestas del más altas perfil y de las profundidades de los cinco valles del perfil más bajos, dentro de la longitud básica). Los resultados presentan relaciones y superficies de Coons que permiten predecir el valor de rugosidad dentro del intervalo de velocidades de corte utilizadas y avances. [Seb09]

El uso de una metodología de superficies de respuestas para desarrollar un modelo matemático para la predicción de la rugosidad (Ra) en el torneado de aleaciones de titanio también ha sido considerado. Los parámetros analizados fueron: velocidad de corte, avance y profundidad, usando herramientas PVD (TiAlN). Se demostró que el avance es el principal factor de influencia en la rugosidad. El acabado superficial incrementa de acuerdo al avance, pero decrece con incrementos de velocidad de corte y avances bajos. El análisis de varianza del modelo de segundo orden y primer orden se utilizaron para validar la significancia de los parámetros usados en el diseño experimental. [Ram07]

Otras investigaciones desarrolladas para maquinado de titanio y sus aleaciones como Ti 6Al-4V en un torno y con carburos convencionales sin recubrimiento para optimizar las condiciones de corte variando los parámetros de maquinado, repercutieron en la vida de la herramienta y sus mecanismos de desgaste, así como en el proceso. Uno de los análisis del proceso permite la reducción de tiempos a través de la correcta elección de la herramienta, con el uso correcto de los parámetros considerando la capacidad de las máquinas y los refrigerantes. También analiza la morfología de la rebaba. [Rib03]

Se ha reportado que la rugosidad depende de diversos factores, como velocidad de corte, avance por diente, radio nariz, desgaste de flanco, propiedades de la herramienta de trabajo. Para el caso del acero y otros metales, la rugosidad disminuye al incrementar la velocidad de corte. Pero para el titanio se encontró que se incrementa al incrementar la velocidad. Ésto es debido a la falla de las herramientas en las altas velocidades en el inserto de carburo de tungsteno y en el PCD (diamante policristalino). También se analizó el nivel de vibraciones, donde se encontrón intensidades altas en la herramienta y husillo, cerca de sus frecuencias naturales. Además se analiza volumen de material removido por vida de herramienta y acabado superficial producido. [Nur07]

Un resumen de las investigaciones consultadas y sus áreas de oportunidad las cuales se destacan en la Tabla 3.1

### **3.4.1. Estado del arte aplicando sistemas inteligentes**

Se ha planteado el uso de un sistema multiobjetivo a través de técnicas de PSO (Particle Swarm Optimization), a procesos de torneado, considerando un grupo de parámetros óptimos de proceso. Los resultados indican que el PSO es eficiente y efectivo para usarlo en el proceso de torneado. [Oze07]

Una comparación de la predicción utilizando una red neuronal y un algoritmo de optimización de cúmulo de partículas para predecir estimación de vida útil de herramienta indica que los resultados obtenidos fueron similares con ambas técnicas de predicción.

Tabla 3.1: Áreas de oportunidad en artículos

Artículo	Autores	Oportunidades
Adiabatic shear banding in high speed machining of Ti-6Al-4V: experiments and modeling	A. Molinari, C. Musquar and G. Sutter	Análisis de elemento. Variación de parámetros de maquinado tales como avance, profundidad, RPM. "Optimizar por medios estadísticos y de sistemas inteligentes". Validación del modelo en un proceso actual
An experimental investigation of effects of cooling/lubrication conditions on tool wear in high-speed end milling of Ti-6Al-4V	Y. Su, N. He, L. Li, X.L. Li	Busqueda de herramientas refrigeradas por dentro. Verificar otros recubrimientos. Hacer pruebas con cambios de parámetros de maquinado tales como avance, velocidad y profundidad de corte "Optimizar por medios estadísticos y de sistemas inteligentes". Validación del modelo en un proceso actual.
Effectiveness of uncoated WC-Co and PCD inserts in end milling of titanium alloy Ti-6Al-4V.	A.K.M. Nurul Amina, Ahmad F. Ismail, M.K. Nor Khairusshima.	Hacer el mismo análisis de vibración radial del husillo, anexar análisis de vibración tangencial de la herramienta, pero analizarla haciendo cambios en los parámetros de maquinado tales como avance y profundidad de corte, así como evaluar velocidad de corte iguales en diferentes herramientas. Checar desgaste y rugosidad superficial "Optimizar por medios estadísticos y de sistemas inteligentes".
Optimization of titanium alloy (6Al-4V) machining.	M.V. Ribeiro, M.R.V. Moreira, J.R. Ferreira.	Revisar refrigerantes, parámetros de corte tales como Vc (RPM), F, d variación. "Optimizar por medios estadísticos y de sistemas inteligentes". Validación del modelo en un proceso actual.
Modeling for prediction of surface roughness in machining of Ti64 alloy using response surface methodology.	S.Ramesh, L. Karunamoorthy, R. Ramakrishnan.	Comprobar la relación en un proceso elaborado en un centro de maquinado, revisando vibración, desgastes, temperaturas, "Optimizar por sistemas inteligentes". Validación del modelo en un proceso actual

[Nat07]

El mayor enfoque de optimización se ha realizado en procesos de torneado. La técnica de optimización PSO es relativamente nueva y posiblemente sea mejor alternativa que los algoritmos genéticos. La mejor estrategia sugerida es el uso de redes neuronales y optimización PSO o algoritmos genéticos [Cha10]

Estudios basados en la topología enteramente unida y usando funciones agregadas en forma lineal. En los que el cúmulo de partículas se reparte equitativamente en  $n$  subcúmulos, cada uno de ellos usa un conjunto diferente de pesos y evoluciona en la dirección de su propio líder. El acercamiento adopta una técnica descendiente para identificar las soluciones óptimas de Pareto. [Bau04]

Se ha planteado el desarrollo de un algoritmo donde sólo un objetivo es perfeccionado a la vez utilizando un plan similar al de ordenado lexicográfico [Coe02], [Hu202]. Este acercamiento adopta la topología del mejor local. En una versión adicional de este acercamiento, se incorpora un archivo externo (que le llamaron "memoria extendida") e introducen mejoras al considerar el acercamiento dinámico [Hu203]

Otros estudios consideran una versión paralela del vector evaluado para el cúmulo de partículas (EVPSO) en solución de problemas multi objetivos. El EVPSO es una variante multi-cumulos que es inspirado en el vector evaluador del algoritmo genético (EVGA) [Par04]. En el EVPSO cada cúmulo de partículas es evaluado usando sólo una de las funciones objetivo del problema que se está considerando y la información que posee para esta función objetivo se comunica a otros cúmulos por el intercambio de sus mejores experiencias (gbest). Se propone que este proceso puede llevar a las soluciones óptimas de Pareto. [Par04]

Otras investigaciones utilizan la optimización por cúmulo de partículas como un algoritmo de respuesta de agente autónomo para el aprendizaje. En ellas se descomponen la función en un conjunto de funciones locales y de este modo modelan el proceso de extracción de la respuesta como un problema de optimización multi objetivo. Un algoritmo



modificado llamado el "cúmulo multi-especies" considera cada función objetivo como un cúmulo de especie. Un canal de comunicación se establece entre los cúmulos cercanos para transmitir la información de las mejor partículas a fin de proporcionar guía para mejorar sus valores. También utiliza la fórmula de vuelo de la topología enteramente unida, pero incluye la velocidad del cúmulo vecino. Tal velocidad se relaciona directamente con la mejor partícula dentro de cada cúmulo (similar a lbest). [Cho04]

Un algoritmo basado en la dominación de Pareto enfatiza la importancia de un individuo y de un grupo de búsqueda (un componente cognoscitivo y un componente social). El mejor valor personal (pbest) de una partícula es una lista de todas las soluciones no dominadas que ha encontrado en su trayectoria. Al tener un pbest determinado, se escoge de manera aleatoria una partícula de la lista. Considerando la topología de anillo, se selecciona la mejor partícula de la vecindad, las soluciones contenidas en las listas de pbest son comparadas, y se toma una solución no dominada con respecto a la vecindad. Sin embargo no se indica cómo se selecciona la partícula de lbest al encontrar más de una partícula no dominada en la vecindad. [Moo99]

Un algoritmo basada en una topología enteramente unida que utiliza conceptos de dominación de Pareto y combinación de conceptos de técnicas evolutivas con el cúmulo de partícula, considera el acercamiento usado como un estimador de densidad del vecino más cercano para promover la diversidad a través de un plan de selección de ruleta de los líderes basado en este valor y un multinivel para manejar las limitaciones. [Ray02]

Se ha considerado la utilización de un archivo externo en el cual se estructuran los datos de una manera diferente denominado árbol dominado donde almacenan los individuos no dominados a lo largo del proceso de búsqueda. Las partículas archivadas interactúan con la primer población a fin de definir los líderes. La selección del gbest para una partícula en el cúmulo se basa en la estructura definida por el árbol dominado. En primer lugar, se selecciona una partícula del árbol en base a la dominación, y entonces la partícula más cercana (en espacio de la función objetivo) es escogido como el líder. Por otra parte, se

localiza un conjunto de partículas líderes (no dominadas) se guardan para cada miembro de cúmulo y la selección es uniforme. También usan un operador de turbulencia que es básicamente un operador de mutación que actúa en la velocidad valore usado por el algoritmo del cúmulo. [Fie02]

Otra propuesta se basa en la idea de tener un archivo externo en el que cada partícula guardará sus experiencias de vuelo después de cada ciclo. Las actualizaciones al archivo externo se llevan a cabo considerando un sistema geográficamente basado en términos de los valores de función objetivos de cada partícula. El espacio de búsqueda está dividido en hipercubos. Cada hipercubo recibe un valor de buen estado físico basado en el número de partículas que contiene. Así, a fin de escoger un líder para cada partícula del enjambre, una selección de rueda de ruleta que usa estos valores de buen estado físico es primero aplicada, para escoger el hipercubo de que el líder se tomará. Una vez que un hipercubo se ha escogido, el líder se escoge al azar. Este acercamiento también usa un operador de mutación que hace ambos procesos en las partículas del enjambre, y en el rango de cada diseño la variable del problema para resolverse. [Coe02], [Coe04]

En el concepto de la dominación de pareto se determina la dirección de vuelo de una partícula. Dividiendo la población de partículas en varios cúmulos. Esto ayuda para proporcionar una distribución más adecuada de las soluciones en el espacio de decisión. Cada sub-enjambre tiene su propio conjunto de los conductores (partículas no-dominadas). En cada sub enjambre, se ejecuta un algoritmo de PSO (los conductores son escogidos aleatoriamente) y, en un cierto punto, los diferentes sub enjambres intercambian información: los conductores de cada enjambre emigran a un enjambre diferente a fin de variar la presión de selección. Este acercamiento no utiliza un archivo externo desde el elitismo y en cambio se utiliza un proceso emergente que se deriva de la migración de conductores. [Tos04]

La manufactura inteligente trata de la integración de sistemas inteligentes en la manufactura (Sistemas de Manufactura Flexible (FMS), Manufactura Integrada por Computadora (CIM), Control Numerico/ Control Numerico Directo (NC/DNC), Dibujo Asistido

por Computadora/Manufactura Asistida por Computadora/Ingeniería Asistida por computadora (CAD/CAM/CAE)). [Gho04]

Los sistemas inteligentes proporcionan un acercamiento estandarizado y metodológico para solucionar problemas importantes y bastante complejos para obtener en un cierto plazo resultados constantes y confiables [Tur04]:

1. Sistemas basados en las reglas del razonamiento (RBR), como los sistemas basados en el conocimiento y utilizados con bases de conocimiento procesal y relacionado
2. Sistemas basados en razonamiento de Modelo (MBR). Utilizan modelos y la configuración de modelos para estimular el proceso conceptual.
3. Sistemas basados en caso de razonamiento (CBR). Utilizan casos históricos para realizar el razonamiento analógico especialmente en problemas naturales cuando nadie domina la teoría existente.
4. Sistemas basados en Marco de razonamiento (FBR). Se utiliza en los problemas estereotipados que se pueden demostrar paso a paso con conocimiento estructurado base.
5. Sistemas probabilísticos del razonamiento, se utilizan en problemas inexactos.
6. La lógica difusa. Se utiliza en problemas inexactos fundados en la incertidumbre (imprecisión) y la posibilidad de condiciones (en vez de probabilidad de condiciones)
7. Redes neuronales (NN), usa redes de conocimiento en vez del conocimiento simbólico [Tur04].
8. Meta-heurística (Mh). Son métodos que se obtienen de conceptos e ideas de otra disciplina (un proceso natural) para ayudar a solucionar los sistemas artificiales modelados

Otra aplicación de los sistemas inteligentes para optimizar el proceso de fabricación de un producto, encuentra las variables críticas para el proceso (Por ejemplo para el caso del diseño de troqueles simples y progresivos). Como conclusión se determina la aplicación del Enfoque Integrador para la Concepción y el Diseño de Sistemas de Ingeniería al caso particular del diseño óptimo multiobjetivo de troqueles de corte y punzonado simples y progresivos. Se propone un sistema que permitirá buscar una solución que satisface no sólo un compromiso razonable entre los indicadores de eficiencia cuantificables de interés, sino también otros indicadores de carácter subjetivo, es decir, el troquel que más adecua desde diferentes puntos de vista. La aplicación exitosa de los Algoritmos Genéticos a la tarea del diseño óptimo multiobjetivo sugiere la idea de su aplicación a otras tareas de diseño de sistemas de ayuda al diseño óptimo multiobjetivo. Esta idea se ve reforzada por la independencia del algoritmo de optimización con respecto a la descripción matemática del proceso tecnológico asociado. [Rui11]

Las responsabilidades de un diseñador en el proceso de toma de decisiones durante el diseño son muchas, pero principalmente [Vel05]:

1. Definir las especificaciones del problema.
2. Elegir criterios de diseño adecuados.
3. Modelar y evaluar.
4. Realizar cálculos empleando técnicas como Analisis de Elemento Finito (FEM).
5. Interpretar y evaluar los resultados del FEM.
6. Elegir la mejor de las soluciones e incluso proponer mejoras.

La última actividad en la lista, depende de la experiencia del diseñador, por lo que no es simple. El diseñador no necesariamente dispone de los parámetros o la capacidad suficiente para asegurar que la última propuesta de solución que obtenga sea la óptima, ya

que le es físicamente imposible evaluar el espectro completo de posibles soluciones. Resulta atractivo contar con una herramienta que permita obtener soluciones de un problema de diseño lo más cercanas posibles a la óptima, cuyo desempeño no dependa de la experiencia del diseñador.

Un análisis del desempeño del maquinado del Acero cold rolled 1018 por medio de superficies de respuesta y redes neuronales, teniendo como datos de entrada la velocidad de corte, el avance y la profundidad de corte, puede considerar el empleo del paquete computacional minitab <sup>®</sup> para el diseño de experimentos y generación de superficies de respuestas. En el caso de las redes neuronales se estructuran 15 capas medias y 3 neuronas. Para la primera capa se emplea una función de transferencia hiperbólica tangente. Los modelos fueron comparados a través del error cuadrático medio, considerando como el mejor modelo aquel que alcance el error cuadrático medio mínimo (MSE). Tres variables independientes fueron incluidas: la velocidad de corte, la tasa de alimentación y la profundidad de corte. La conclusión revela que la velocidad de corte y la tasa de alimentación son factores que afectan significativamente la rugosidad superficial de la pieza de trabajo. La rugosidad superficial decrece al incrementar la velocidad de corte, pero se incrementa con la tasa de alimentación. Por otro lado la temperatura de la herramienta y del material de la pieza de trabajo son influenciados significativamente por la velocidad y la profundidad de corte. Finalmente se recomienda para investigaciones futuras crear modelos que utilicen diferentes materiales y herramientas de corte. Otras recomendaciones son utilizar otros factores de importancia tales como la vibración de la máquina, el desgaste de la herramienta de corte y su geometría. [Laz05]

Otro trabajo considera la influencia de los parámetros de operación en la vida de la herramienta cuando se maquina la aleación de níquel 718. Describen los efectos de la variación de la velocidad, el espesor de la viruta, la profundidad de corte, material de la herramienta y la geometría en la vida de la misma, el desgaste de la herramienta y la productividad obtenida. Dicho trabajo fue llevado a cabo en 2 fases. La primera utilizó

un material de herramienta y su geometría, analizando los efectos de varias velocidades y profundidades. En la segunda fase se redujo el número de parámetros para examinar diferentes materiales de herramientas y geometrías. Los resultados muestran que un sólo tipo de material o geometría de herramienta no son suficientes para obtener los mejores resultados. Sin embargo pueden identificarse combinaciones de materiales y geometrías con resultados satisfactorios para incrementar la productividad dependiendo del volumen de material que se quiera eliminar. [Kra07]

Es posible analizar los efectos del recubrimiento de material en la herramienta de corte así como la velocidad de la misma, las fuerzas y el acabado superficial para la aleación de níquel 718. Cuando es maquinada con 3 diferentes herramientas de corte de carburo cementado en un torno de control numérico. El proceso de remoción de material cuando en la velocidad de corte de 15 a 75 m/min variando en 15 m/min usando 2 mm de profundidad de corte y un avance de 0.20mm/rev constantes. La fuerza principal  $f$ , es considerada un parámetro. En la experiencia, dependiendo del recubrimiento de la herramienta, la menor fuerza de corte encontrada fue 506 N con 75 m/min con un inserto de carburo cementado con una capa de recubrimiento de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, la menor rugosidad de la superficie fue 0.806 que es obtenida con una velocidad de 15 m/min con un recubrimiento simple de TiN en el inserto de carburo cementado.[Nal07].

La optimización de los parámetros de corte para la aleación 718 pueden ser determinados con el fin de obtener una rugosidad mínima analizando la remoción de material. Haciendo esto, las ventajas de las técnicas del diseño estadístico experimental, mediciones experimentales, redes neuronales artificiales y optimización por algoritmos genéticos pueden ser exploradas e integradas. Los experimentos son realizados y diseñados en base a la técnica de estadística factorial de 3 niveles. Un modelo predictivo de acabado superficial se puede crear usando redes neuronales para la exploración de datos experimentales. El modelo de la red neuronal y la definición analítica de remoción de material son empleados en la construcción del problema de optimización. Esta optimización es resuelta

por un algoritmo genético para variedad de límites restrictivos. Experimentos adicionales pueden usarse para comparar valores óptimos y sus respuestas en rugosidad y usando valores predichos por el algoritmo genético para la remoción de material. Generalmente se observa una buena correlación entre la predicción óptima y la medición experimental. La red neuronal en conjunto con el algoritmo genético es efectiva para encontrar los parámetros de maquinado óptimos que sirven para especificar las opciones de maquinado en una máquina de control numerico (CNC) para aleación 718. [Ozc05]

Otras investigaciones enfocan su trabajo experimental en los efectos del cambio de parámetros de operación en la vida útil de la herramienta, productividad y desgastes de la misma obtenidos al maquinar la aleación 718. [Esc09]. La pieza de trabajo utilizada fue un pedazo de material rectangular de aleación 718 con una composición química de 53 % Ni, 18.1 % Cr, 5 % Nb, 3.1 % Mo, 0.9 % Ti, 0.4 % Al, 0.04 % C, 0.3 % Si, 0.2 % Mn y Fe balanceado (en % de peso). Este material fue tratado y envejecido para alcanzar una dureza de 40 HRC. Las pruebas de maquinado se llevaron a cabo en un Centro de Maquinado Horizontal Cincinnati H5-800 XT empleando un velocidad de corte constante con un límite máximo de 6000 RPM y con motores de 29.5kW.

El desgaste de la herramienta fue medido con un microscopio provisto con una cámara digital y un software analizador de imagen durante las pruebas de maquinado siguiendo la norma ISO 8688-2-1989. Las pruebas fueron llevadas a cabo en una pieza previamente maquinada, cortes entre 25 y 100 mm se realizaron dependiendo del nivel de desgaste experimentado. El corte inicial en el material y el corte final fueron conducidos con un inserto diferente al que se utilizó en la prueba para eliminar su influencia al inicio o final de la prueba. Las pruebas fueron detenidas cuando el desgaste promedio del flanco o el máximo desgaste local se encontraban en 0.25 o 0.5mm, respectivamente. Cada prueba fue realizada 2 veces para mejorar la confiabilidad estadística. Cuando se tuvo una variación grande se llevó a cabo una prueba adicional.

# Capítulo 4

## Marco Teórico

### 4.1. Conceptos Generales de Maquinado y Rugosidad

El proceso de corte de metal ocupa un lugar importante en la industria manufacturera. En el presente trabajo de investigación se puntualiza el estudio en el área de aeronáutica, en un proceso que se realiza para la remoción de metal en donde es prioritario utilizar parámetros adecuados de corte, a través de la utilización correcta de estos valores se obtendrá la calidad dimensional y superficial que los productos requieren.

Puede considerarse que para ser productivo en esta rama de la industria es fundamental llegar a concatenar los valores de los parámetros de corte con cada tipo de material que se requieren cortar. En este capítulo se abordarán los conceptos vitales en la remoción de material.

#### 4.1.1. Maquinado y Maquinabilidad

El maquinado es un proceso de manufactura en el cual se produce la remoción de material en una pieza de trabajo usando una herramienta de corte. La maquinabilidad se refiere a las propiedades del material que ayudan a diferenciar que tan sencilla es la remoción del mismo en un proceso de maquinado. Entonces debe considerarse la importancia de encontrar la combinación óptima de los valores que se utilizaran en el corte del material de trabajo. [Esc09]



Un material que tiene una buena maquinabilidad, con frecuencia tiene como resultado un mejor acabado tanto superficial como dimensional lo cual crea un producto de mejor calidad y costo.

Los parámetros que son trascendentales en la operación de maquinado son: la velocidad de corte, el avance de la herramienta, la profundidad de corte y una adecuada elección de la herramienta. Esta tesis se enfoca en el análisis del proceso de fresado el cual requiere una herramienta de múltiples filos para efectuar su trabajo. Resumiendo el concepto de maquinado, se requiere el movimiento relativo de la herramienta y la pieza de trabajo, dentro de estos movimientos existen tres tipos principales:

- $V =$  Velocidad de corte (m/min)
- $f =$  Avance (mm/rev)
- $p =$  profundidad de corte (mm)

Algunos detalles de estas variables se mencionan a continuación:

#### 1. **Velocidad de corte:**

Es la velocidad con la cual un punto de la circunferencia de la herramienta pasa por la pieza de trabajo en un minuto.

Para el calculo de las velocidades de corte se utilizan las siguientes formulas segun el sistema de unidades que se este trabajando.

Para el Sistemas Metrico ver ecuación 4.1

$$V = \left( \frac{\pi * d * \eta}{1000} \right) \quad (4.1)$$

- $V =$  Velocidad de corte (m/min)
- $d =$  Diámetro (mm)

- $\eta =$  **Rotaciones del husillo (rev/min)**

## 2. Velocidad del husillo:

Es la cantidad de vueltas que el husillo dará en un minuto. Se mide en revoluciones por minuto (rev/min). Para el cálculo de las velocidades de corte se utilizan las siguientes fórmulas según el sistema de unidades que se considere.

Para el Sistemas Métrico usando ecuación 4.2

$$\eta = \left( \frac{1000 * \mathcal{V}}{\pi * d} \right) \quad (4.2)$$

## 3. Avance:

El avance de la máquina fresadora puede definirse como la distancia en pulgadas o milímetros por minuto que se mueve la pieza hacia la herramienta. Las fórmulas para calcular el avance en un proceso de fresado se indican a continuación:

- a). Avance por revolución:

$$f = \left( \frac{\mathcal{V}_f}{\eta} \right) \quad (4.3)$$

- b). Avance por diente:

$$fz = \left( \frac{\mathcal{V}_f}{\eta * z} \right) \quad (4.4)$$

- c). Avance por minuto:

$$\mathcal{V}_f = fz * \eta * z \quad (4.5)$$

Donde:

$fz =$  Avance por diente (mm/min)

$f =$  Avance por revolución (mm/rev)

$\eta =$  Rotaciones del husillo (RPM)

$z =$  Número de dientes

$V_f$  = Avance por minuto

Las operaciones básicas de maquinado se mencionan a continuación:

■ **Desbaste ( $\nabla$ ) :**

Remueve grandes cantidades de material de la pieza rápidamente a manera de producir una forma cercana a la pieza deseada.

■ **Acabado ( $\nabla\nabla$ ) :**

Se utiliza para alcanzar las dimensiones, tolerancias y acabados finales de la superficie. Para determinar la velocidad de corte se deben de considerar las siguientes características:

1. Material del que esta compuesto la pieza de trabajo
2. Material de la herramienta de corte
3. El uso del refrigerante
4. Tipo de máquina

#### 4.1.2. Rugosidad Superficial.

Una superficie totalmente plana es un concepto ideal, ya que toda superficie por perfecta que sea o parezca, tendrá irregularidades originadas durante su proceso de elaboración.

Las irregularidades grandes conocidas como "macrogeométricas" son errores de forma vinculados con la variación de la pieza en su tamaño, pudiendo ser: paralelismo entre caras de las superficies y planicidad o conicidad en superficies, cilíndricidad y redondez, de las que se pueden hacer mediciones con instrumentos convencionales para detectarlas. Las irregularidades menores o "microgeométricas" de las piezas comprenden la rugosidad y la ondulación. La ondulación puede ser ocasionada por flexión de la pieza durante el

proceso de maquinado, falta de homogeneidad del material, liberación de esfuerzos residuales, deformaciones por tratamiento térmico, vibraciones, etc. La rugosidad la provoca el elemento utilizado para realizar el maquinado, por ejemplo, la herramienta de corte o la piedra de rectificado.

El grado de rugosidad de la superficie es importante para la aplicación de la pieza, algunas veces es necesario obtener valores elevados de rugosidad. En otras ocasiones esto no es deseable, porque la superficie del producto requiere de una mejor apariencia o requiere menor fricción y evitar el desgaste de la pieza.

La Figura 4.1 ilustra la superficie de una pieza en la que se observan marcas unidireccionales originadas por el proceso de maquinado utilizado la ondulación de la superficie. Si se amplifica esta superficie se puede observar con mayor claridad la ondulación, además de apreciar otras irregularidades más pequeñas súper-impuestas. Con otra amplificación se observa la rugosidad; a las partes altas se les denomina “picos” a las bajas “valles”. Esta forma de examinar el acabado superficial se denomina “método de perfil”. [Esc09]

Existen varios parámetros que reflejan la medición de la rugosidad, como  $R_a$ ,  $R_y$ ,  $R_z$ . La más común es  $R_a$  la cual es la media aritmética de los valores absolutos de la distancia el perfil de rugosidad de la línea de la longitud de medición (véase la Figura 4.2). Ésta se calcula con la ecuación 4.6.

$$R_a = \left( \frac{1}{L} \right) \int_{x=0}^{x=L} |y| dx \quad (4.6)$$

En donde:

- $L$  es variable que controla la longitud de muestreo
- $y$  es la ordenada del perfil desde la línea media
- $R_a$  es la variable de rugosidad media aritmética ( $\mu\text{m}$ )

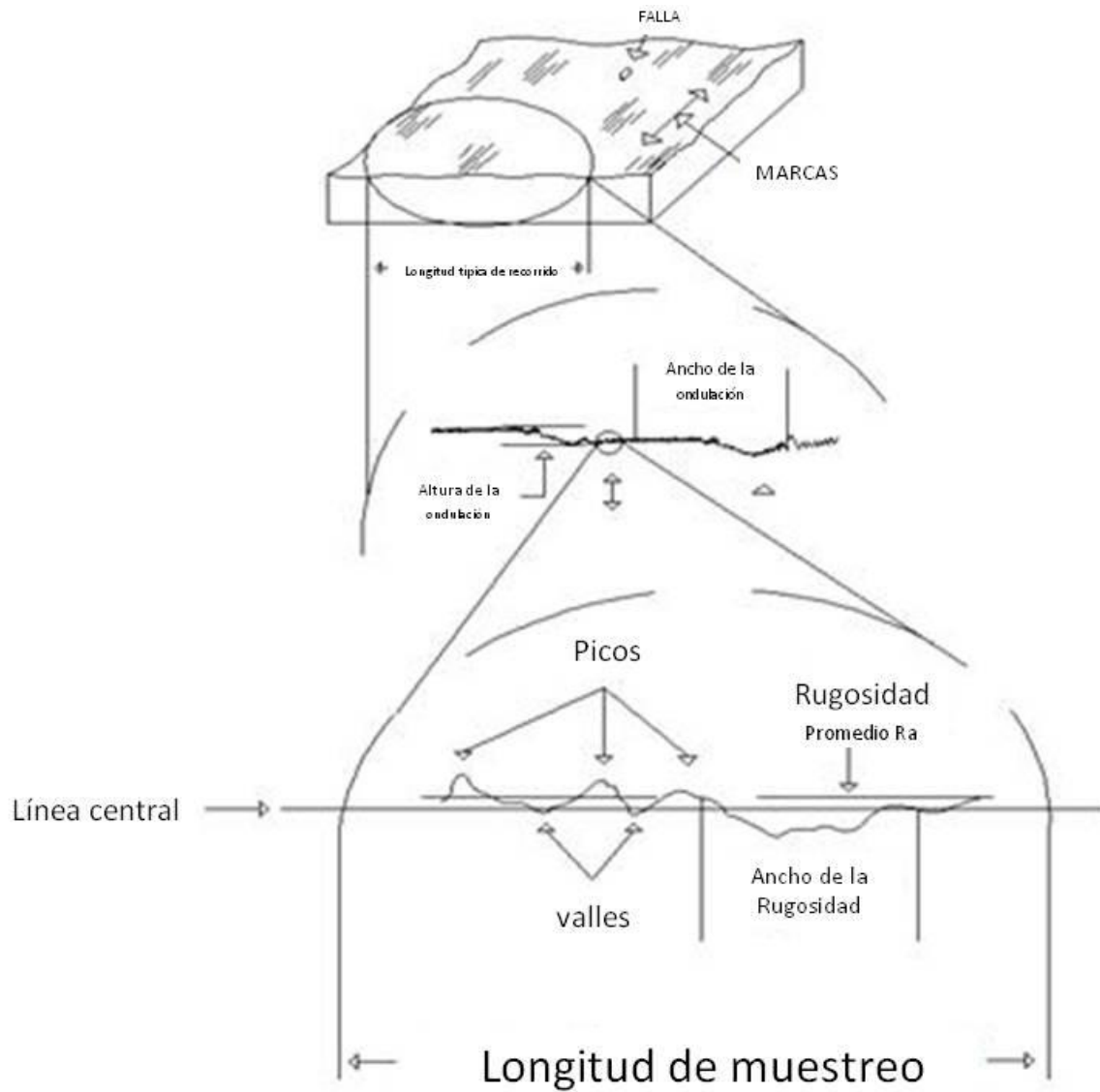


Figura 4.1: Ampliación de la ondulación de la superficie

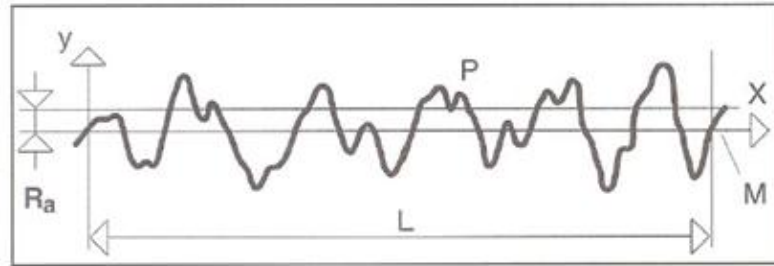


Figura 4.2: Gráfica de Ra para la medición de la rugosidad

### 4.1.3. Temperatura.

En el proceso de maquinado de cualquier pieza, se presenta un incremento en la temperatura debido a la relación que hay entre la viruta generada del material y la herramienta por causa de la fricción que se genera en el plano cortante. Existen diversas formas para medir la temperatura tales como medición a través de termopares, mediante procesos termofísicos y mediante termometría de radiación infrarroja, que es el proceso que se utilizó en esta investigación. En este último método la energía que un cuerpo emite es expresada como temperatura termodinámica. Este tipo de medición explora a través de una medición no-invasiva y se obtiene la temperatura del cuerpo a través de la medición de la emisión térmica. Siendo un fenómeno complicado, primero se debe considerar la emisión espectral de un objeto real en relación con un cuerpo negro. Para considerar un cuerpo negro, se deben de tener 3 propiedades: primera, que absorba la radiación sin importar la dirección y la longitud de onda; segunda, en un punto específico la longitud de onda y la temperatura ningún objeto puede emitir mas energía que un cuerpo negro; y tercero que la radiación que un cuerpo negro emite es indistinto de su dirección.

La potencia que se emite por unidad de área en un cuerpo negro a una longitud de onda determinada y temperatura específica se le conoce como “potencia espectral emisiva” es controlada por la ley de Planck, (ver Ecuación 6.12).

$$E_{\lambda,b} = \left( \frac{C_1}{\lambda^5 (e^{C_2/(\lambda T)} - 1)} \right) \quad (4.7)$$

donde:

$C_1$  es considerada la primer constante de Planck que tiene un valor de  $3742 \times 10^{-16} \text{ Wm}^2$ ,  $C_2$  es considerada la segunda constante de Planck que tiene un valor de  $1.4385 \times 10^{-2} \text{ mK}$ , la variable  $\lambda$  es la longitud de onda emitida en metros (m) y la variable T es la temperatura termodinámica del cuerpo negro en unidades kelvin (K). Si se integra en la ecuación 6.12 en todas las longitudes de onda, se genera la ley de Stefan-Boltzmann (Ecuación 4.8) que sirve para calcular la potencia total emitida por unidad de área.

$$E_b = \sigma T^4 \quad (4.8)$$

En donde  $\sigma$  es conocida con el valor de  $5.670 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \text{K}^4)$  denominada como constante Stefan-Boltzman, la constante T ya mencionada es la temperatura del cuerpo negro (K).

La desventaja (del sistema descrito) con la termometría de banda espectral es que depende de la emisividad superficial del material que se está midiendo y que es una fracción total de la radiación emitida por la superficie real entre la radiación emitida por el cuerpo negro considerando la misma temperatura para ambos y debe ser un valor entre cero y uno (ver Figura 4.3), al considerar la emisividad el cuerpo denominado cuerpo gris y la ley de Stefan-Boltzmann se modifican en la Ecuación 4.8 resultando la siguiente Ecuación 4.9

$$E = \epsilon \sigma T^4 \quad (4.9)$$

En donde  $\epsilon$  es la constante de emisividad de la superficie,  $\sigma$  es conocida con el valor de  $5.670 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \text{K}^4)$  denominada como constante Stefan-Boltzman, la constante T ya mencionada es la temperatura del cuerpo negro (K).

La forma mas fácil de calibrar la emisividad de una superficie es por medio del instrumento de medición directamente sobre la pieza que se va a medir, es decir, dirigiendo el detector del termómetro de radiación a la superficie y midiéndolo la temperatura con otro

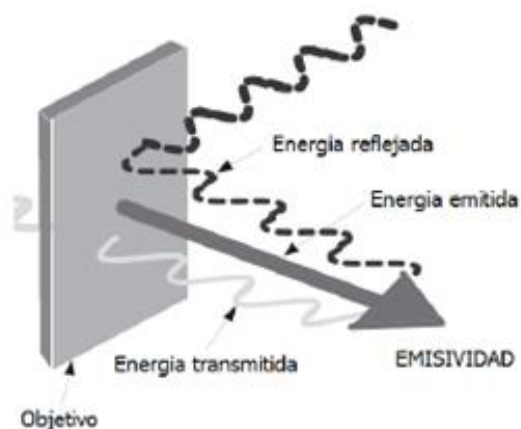


Figura 4.3: Emisividad de la pieza en un objeto

Tabla 4.1: Emisividad de diferentes materiales.

Material	Coefficiente de emisividad	Material	Coefficiente de emisividad
Acero oxidado	0.80	Hierro oxidado	0.70
Agua	0.93	Aleación base níquel	0.80
Aluminio	0.30	Latón	0.50
Basalto	0.70	Níquel	0.35
Carbon	0.85	Plomo	0.50
Cobre	0.95	Titanio	0.10

instrumento. También existen coeficientes de emisividad ya conocidos para determinados materiales, en la Tabla 4.1 se muestran los principales

## 4.2. Cúmulo de Partículas (OCP)

Las partículas pueden ser influenciadas por cualquier otra que tenga éxito. Estos vecinos no son necesariamente partículas que está mutuamente cercanos de la variable de decisión en el espacio, hay partículas que están cerca entre ellas, basadas en una topología de vecindad que definen la estructura del OCP [Ken01]. Las partículas pueden unirse en cualquier tipo de topología de vecindad, como se describen a continuación.

a.- Gráfica vacía: En esta topología, las partículas se aíslan. Cada partícula está



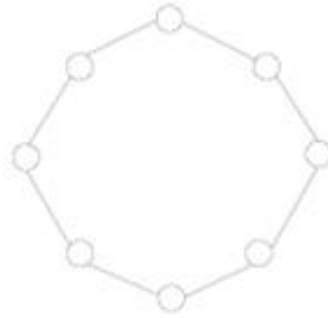


Figura 4.4: La topología de vecindad anidada que representa la escena del mejor local cuando  $k = 2$ . Cada círculo representa a una partícula

unida sólo consigo misma, y compara su posición actual sólo a su posición mejor encontrada hasta ahora ( $p_{best}$ ) [Eng02]. En este caso,  $C_2 = 0$  en la Ecuación 3.2.

b.- Mejor local: En esta topología, cada partícula es afectada por la mejor ejecución de sus vecinos inmediatos de  $k$ . Las partículas son influidas por la mejor posición dentro de su vecindad ( $l_{best}$ ), así como su propia experiencia pasada ( $p_{best}$ ) [Eng02]. Cuando el  $k = 2$ , esta estructura es equivalente a una topología de anillo tal como se muestra en la Figura 4.4. En este caso, el líder es igual a  $l_{best}$  en Ecuación 3.2.

c.- Gráfica completamente conectada: Esta topología es lo opuesto de la gráfica vacía. La topología enteramente unida une todos los miembros del cúmulo uno al otro. Cada partícula usa su historia de experiencias desde el punto de vista de su propia solución mejor hasta ahora ( $p_{best}$ ) pero, además, la partícula usa la posición de la mejor partícula del cúmulo entero ( $g_{best}$ ). Esta estructura es la topología de estrella, también llamada en la comunidad de OCP [Eng02]. Véase la Figura 4.5. En este caso, líder es igual a  $g_{best}$  en la Ecuación 3.2.

d.- Red en estrella: En esta topología, una partícula es unida con todas las otras y son unidas solamente para esta única partícula denominada "partícula focal" [Eng02]. Véase la Figura 4.6. Las partículas son aisladas una de otra, llevando la información que tiene que comunicarse proveniente de la partícula focal. La partícula focal

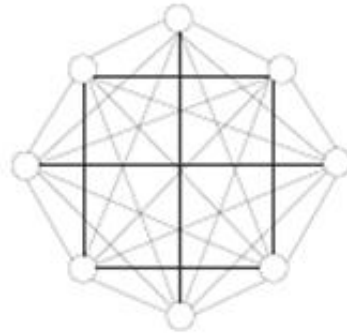


Figura 4.5: La gráfica de todo conectado representa la topología de vecindad con conexión completa (cada círculo representa una partícula). Todos los miembros del cúmulo están conectados entre sí



Figura 4.6: Topología estrella (cada círculo representa una partícula). El principal objetivo es conectar todas las partículas y ellas son conectadas a una.

compara las ejecuciones de todas las partículas en el cúmulo y ajusta su trayectoria hacia lo mejor, esa ejecución se comunica finalmente al resto del cúmulo, a esta estructura también se le denomina topología de rueda. En este caso, líder es igual a focal en la Ecuación 3.2.

e.- Red de árbol: En esta topología, todas las partículas conforman un árbol y cada árbol contiene exactamente 28 partículas. Véase la Figura 4.7. Una partícula es influenciada por su mejor posición hasta ahora ( $p_{best}$ ) y por la mejor posición de la partícula que se encuentra arriba en el árbol (padre). Si una partícula hijo ha encontrado una solución que es mejor que el que se considera el mejor hasta ahora,

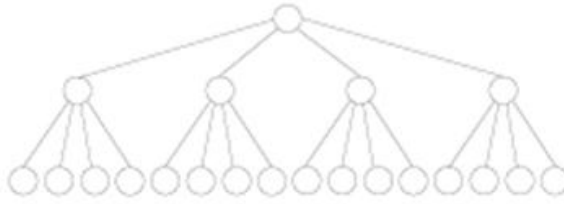


Figura 4.7: Topología árbol, todas las partículas tienen un arreglo en forma de árbol y cada 3 nodos es una partícula [Jan03]. Las partículas son influenciadas por su mejor posición (pbest) y la mejor posición de la partícula marcada en el árbol. En esta figura se puede ver un ejemplo de la topología definida por un árbol rectangular con una altura igual a 3, con 4 partículas en cada una, es decir un total de 21 partículas

se convierte en partícula matriz, ambas partículas son cambiadas. De este modo, esta topología ofrece una vecindad dinámica. Esta estructura de topología también es llamada jerárquica. En este caso, el pbest de líder es el padre en la Ecuación 3.2

La topología es la que determina el tiempo de convergencia del algoritmo para determinar cuánto le lleva a la partícula encontrar la mejor localización en el espacio de búsqueda. Por ejemplo, para la topología enteramente unida, todas las partículas están conectadas unas con otras, éstas reciben la información de la mejor solución del cúmulo entero al mismo tiempo, así, al usar la topología enteramente unida, el cúmulo tiende a converger más rápidamente que al usar la topología de mejor local. Al usar la topología mejor local, la información de la mejor posición del cúmulo toma más tiempo para ser llevada. Sin embargo, para la misma razón, la topología enteramente unida es también susceptible para experimentar convergencia prematura (i.e., para converger para óptima local) [Eng05].

Cuando un cúmulo comienza, incluye posición y velocidad. El pbest correspondiente de cada partícula es inicializado y el líder es localizado (normalmente la solución de gbest es escogida como el líder). Entonces, para maximizar el número de iteraciones, cada partícula busca en el espacio de búsqueda su posición (usando 3.1 y 3.2) y su pbest y finalmente, el líder es actualizado también. El pseudocódigo general del Algoritmo de Cúmulo de

partículas es:

Comienzo

    Inicio del cúmulo

    Líder local

$g=0$

    Mientras  $g < g_{\max}$

        For cada partícula

            Actualización de la partícula

            Evaluación

            Actualización pbest

        Fin For

        Actualización líder

    Fin Mientras

Fin

#### 4.2.1. Optimización de cúmulo de partículas para problemas multiobjetivo

El conjunto de soluciones de un problema con objetivos múltiples no es una solución sencilla (como en la optimización general). En la optimización multiobjetivo el enfoque es encontrar un conjunto de soluciones diferentes (el llamado conjunto óptimo de pareto). Por lo general, al resolver un problema multi-objetivos se pretende cubrir tres metas principales que son [Zit00]:

1. Maximizar el número encontrado de elementos del conjunto óptimo de pareto.

2. Minimizar la diferencia del frente de pareto predicho por el algoritmo con respecto al valor real.
3. Minimizar el grupo de soluciones encontradas, de modo que se pueda tener una distribución de vectores plana y uniforme tanto como sea posible.

La manera en que un algoritmo de optimización multiobjetivo por medio de cúmulo de partículas generalmente trabaja se presenta a continuación:

1. Generación de una posición aleatoria por partícula. Cada posición representa una posible solución en el espacio de búsqueda
2. Evaluación de cada posición de las partículas y asignación de un peso (fitness). Determinar el mejor global y local y almacenarlos.
3. Usar la Ecuación 4.10 para asignar el peso

$$F(X) = w_1 * N_t(X) + w_2 * N_r(X) \quad (4.10)$$

Donde:

$w_1$ =peso inercial para la variables de entrada

$w_2$ =peso inercial para las variables de la capa intermedia

4. Usar las ecuaciones 3.1 y 3.2 para determinar la velocidad y la nueva posición de cada partícula.
5. Ir al paso 2 o terminar la condición de satisfacción.

Los aspectos que caracterizan a los algoritmos de optimización multiobjetivo son:

1. Selección y actualización de los líderes:

\* ¿Cómo escoger un líder que no esté dentro del conjunto de las soluciones no-dominadas?. ¿Cual es el que verdaderamente conviene?

\* ¿Se debe escoger este líder de manera aleatoria o se debe usar un criterio adicional?

\* ¿Cómo escoger las partículas que deben permanecer almacenadas como las mejores de una iteración a otra?

2. La creación de nuevas soluciones:

\* Cómo promover diversidad por los dos mecanismos principales para crear nuevas soluciones: la actualización de las posiciones (ecuaciones 3.1 y 3.2) y la mutación.

#### 4.2.2. Líderes en optimización multi-objetivo

La solución de un problema multi-objetivo consiste en un conjunto de soluciones con valor de optimización igual o parecido, con esto se demuestra que el concepto del líder tradicional se debe modificar. La selección de un líder es un componente importante al diseñar un algoritmo de optimización multiobjetivo. Lo común es considerar cada solución de partículas no-dominadas como líder y seleccionar una de ellas como nuevo líder, lo importante es buscar la forma de medir la eficiencia del líder. Tal característica puede ser definida en formas diferentes. Una posible vía de definir tal medida puede estar relacionada con la densidad, o sea mecanismos basados en la cercanía de las partículas dentro del cúmulo, dos de las más importantes medidas de densidad usadas en el área de optimización multi-objetivo son:

1. Estimador de densidad del vecino más cercano [Kal02]. El estimador de densidad del vecino más cercano da una idea de cómo se van acercando las partículas en un espacio especificado a una función objetivo. Esta medida estima el perímetro

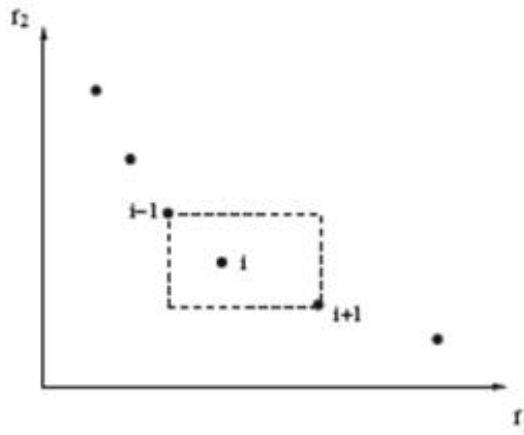


Figura 4.8: Estimador de densidad del vecino más cercano

del paralelepípedo rectangular formado usando los vecinos más cercanos como los vértices. Véase la Figura 4.8.

2. Estimador de densidad Kernel [Gol87], [Kal89]. Cuando una partícula está compartiendo recursos con otros, el peso es degradado en razón del número y cercanía de las partículas dentro de cierto perímetro. Una vecindad de partículas es definida desde el punto de vista de un parámetro que indica el radio de la vecindad. Tales vecindades son llamados "nichos". Véase la Figura 4.9

### 4.2.3. Retener las Partículas No dominadas

Es importante retener las soluciones no dominadas encontradas a lo largo de todo el proceso de búsqueda de modo que se puedan usar dichas soluciones como optimización con respecto a todas las poblaciones previas. [Gun98]. El tamaño de las soluciones tiende a crecer, por lo que se debe establecer un juicio para la selección de los mejores y la actualización de los mismos de acuerdo a cada generación explorada, de tal manera que no se vuelva costoso el análisis debido a la gran cantidad de partículas y ello lo vuelva demasiado complejo. La complejidad del proceso de actualización se puede expresar con la siguiente ecuación ( $KN^2$ ), donde la  $N$  es el tamaño del cumulo y  $K$  es el número de

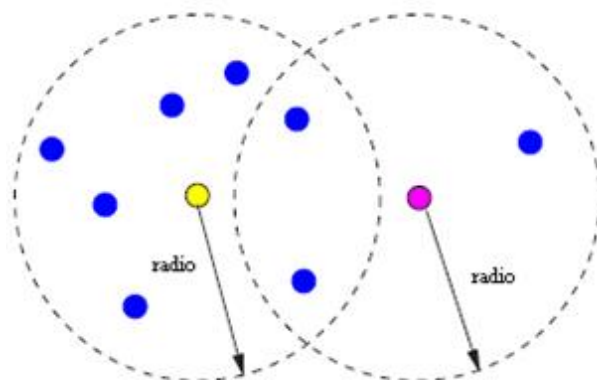
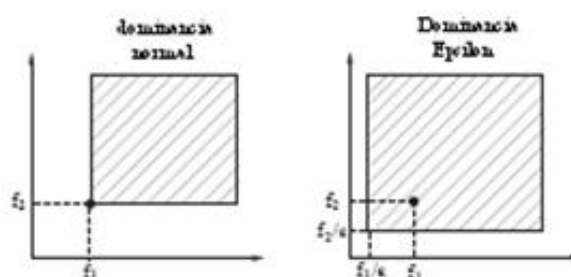


Figura 4.9: Estimador de densidad Kernel

Figura 4.10: Forma de dominación relajada  $\epsilon$ 

objetivos. De este modo, la complejidad del proceso de actualización para una corrida completa es  $(KMN^2)$ , donde la  $M$  es el número total de iteraciones. Una manera de evitar esto, es el uso de una forma de dominación relajada, con el uso de la dominación  $\epsilon$  se muestra en la Figura 4.10. Este concepto es usualmente utilizado para filtrar soluciones en la optimización multiobjetivo. Consiste en definir un cuadro de tamaño  $\epsilon$  y sólo una solución no dominada es la ganadora de cada caja.

En la figura 4.11, se muestra la dominación  $\epsilon$  para un caso de análisis de 2 objetivos. El uso de esta dominación garantiza que las soluciones retenidas son no dominantes con respecto a todas las soluciones generadas durante la corrida. Sin embargo, al usar la dominación  $\epsilon$  el tamaño del archivo de soluciones final depende del valor de  $\epsilon$ , que es



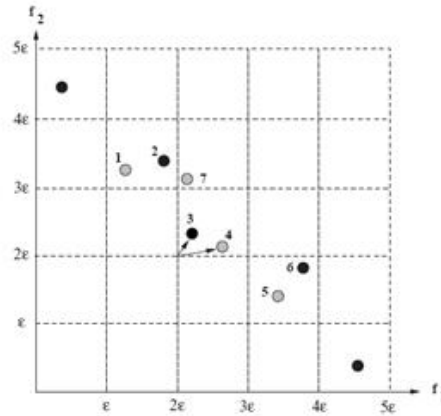


Figura 4.11: Un ejemplo del uso de la dominación de  $\epsilon$  en un archivo externo

normalmente un parámetro definido del usuario [Lau02].

#### 4.2.4. Promover diversidad al crear nuevas soluciones

Una de las características del algoritmo de cúmulo de partículas es su convergencia rápida. Ésto es algo positivo mientras no se tenga convergencia prematura (convergencia a un grado óptimo local).

La convergencia prematura es causada por la pérdida rápida de diversidad dentro del cúmulo, así, la apropiada diversidad es importante, por lo que se requiere controlar la convergencia del cúmulo de partículas. Para promover la diversidad al momento de seleccionar los líderes, se pueden tener dos mecanismos principales para crear nuevas soluciones que son:

1. **La actualización de posiciones.** El uso de topologías de vecindad diferentes determina que tan rápidamente se vuelve el proceso de transferir la información a través del cúmulo de partículas. En una topología enteramente unida todas las partículas están relacionándose mutuamente, y por ello la información es transferida rápidamente a diferencia del caso de un mejor local o una topología de árbol, pero en estos casos las partículas tienen vecindades más pequeñas. Bajo el mismo argumen-

to, una topología de vecindad específica determina la diversidad dentro del cúmulo. Entonces en una topología enteramente unida, la transferencia de la información es rápida, pero al usar esta topología, la diversidad dentro del cúmulo también se pierde rápidamente. De este modo, las topologías que definen las vecindades pequeñas pueden preservar también diversidad dentro del cúmulo por un tiempo mayor. Por otra parte, la diversidad puede controlarse mediante el peso de inercia ( $W$  en Ecuación 3.2). El peso de inercia es empleado para controlar el impacto de la historia previa de velocidades en la velocidad actual. Así, el peso de inercia influye en la habilidad de exploración local y global [Shi98]. Un peso de inercia grande facilita la exploración global (busca nuevas áreas), mientras que un peso de inercia más pequeño tiende a facilitar la exploración fina en el área de búsqueda actual. El valor del peso de inercia puede variar durante el proceso de optimización. Puede considerarse que [Shi99] la linealidad disminuye el peso de inercia, con lo que el cúmulo de partículas tiende a tener habilidad de búsqueda más global al comenzar la corrida y habilidad de búsqueda más local cerca del fin de la misma. Por otra parte, la habilidad de búsqueda [Zhe03] global o local tiene un peso de inercia pequeño y que un peso de inercia grande proporciona al algoritmo mayor posibilidad de estabilizarse. La velocidad de la posición actual para generar la próxima posición es similar a la mutación en algoritmos evolutivos, exceptuando que la mutación en el cúmulo de partículas se guía por la experiencia de una partícula y la de sus vecinos.

2. **El uso de un operador de mutación (o turbulencia).** Cuando una partícula actualiza su posición una mutación ocurre. A veces, sin embargo hay cierta inconsciencia, denominadas “locuras.”<sup>en</sup> la propuesta original del cúmulo de partículas [Ken95]. La locura refleja el cambio en el vuelo de una partícula sin control [Fie02]. Por lo general, cuando un enjambre se estanca, es decir, cuando las velocidades de las partículas son casi cero, se vuelve incapaz para generar nuevas soluciones que

podrían llevar el cúmulo fuera de este estado. Este comportamiento puede llevar al cúmulo completo a quedarse en un grado óptimo local del cual no pueda salir. De este modo, el uso de un operador de mutación es muy importante a fin de escapar de un óptimo local y para mejorar las capacidades exploratorias de cúmulo. Un operador de mutación bueno es difícil de obtener y tiene un impacto significativo en la ejecución, una vez que se ha escogido un operador de mutación específico.

Existen diferentes taxonomías de acercamiento para las partículas dentro de una optimización multi-objetivo a través de cúmulo de partículas de las cuales se pueden destacar las siguientes:

- **Funciones agregadas.** Esta taxonomía combina (o agrega) todos los objetivos del problema en uno sólo. En otros términos, el problema multi-objetivos es transformado en un objetivo sencillo. Ésta nace de una iniciativa para las soluciones no dominadas [Kuh51]. Este algoritmo puede hacerse de tres formas diferentes:
  1. una función de funciones agregadas en forma lineal (donde los pesos son fijos durante toda la corrida),
  2. una función de funciones agregadas dinámica (donde los pesos se modifican gradualmente durante la corrida) y
  3. un peso agregado (donde los pesos se modifican durante toda la corrida) [Jin01].
- **Orden lexicográfico.** En este método el programador pondera los objetivos en orden de importancia. La solución óptima se obtiene minimizando la función objetivo de manera separada, comenzando con los objetivos más importantes y procediendo según el orden asignado [Mie99]. El orden lexicográfico tiende a ser útil sólo cuando se analizan pocas funciones objetivo (dos o tres) y puede ser sensible el orden que se le da a los objetivos [Coe99].

- **Acercamiento por sub-población.** Este acercamiento supone el uso de varias sub-poblaciones para mejorar objetivos sencillos. Las sub poblaciones intercambian la información o se combinan entre ellas para producir soluciones diferentes que las que se hayan obtenido con anterioridad.
- **Acercamiento en base al pareto.** Este acercamiento usa las técnicas de selección de líder basadas en la dominación de Pareto. La idea básica de todos los acercamientos es escoger como las partículas líderes que son no dominadas con respecto al cúmulo, para formar el grupo de soluciones.

# Capítulo 5

## Metodología de la Investigación.

### 5.1. Introducción

La metodología generada incluye una búsqueda del estado del arte. El titanio es un material que por sus propiedades, su costo y sus usos es difícil de adquirir en el comercio local, para lo cual Frisa Forjados S.A. de C.V. apoyó en la solución de esta problemática, proporcionando material así como la experiencia del personal en el maquinado de esta aleación. Otro rubro importante dentro del estudio denota el estado del arte de los sistemas inteligentes, métodos que permiten la simulación de problemas físicos complejos los cuales se quieren analizar de una manera extremadamente próxima a la situación real. Para comenzar a experimentar con estos sistemas inteligentes se hicieron pruebas con datos obtenidos en maquinados de acero 1018 y 4140 y el objetivo de estas pruebas fue predecir los parámetros de maquinado a través de una red neuronal de retro-propagación, la cual es una de las redes más utilizadas para predicción. También se hicieron estudios estadísticos y dentro de la búsqueda de soluciones, se encontraron parámetros utilizados en el maquinado de titanio en la literatura. Una vez que se analizan diferentes formas de predicción, se determina el sistema que más se adopta a las necesidades del estudio, para aplicarlo en un caso práctico y obtener los parámetros de maquinado mejorados y llevarlos al proceso productivo, con lo cual se puede validar la predicción. En la Figura 5.1 se bosqueja la metodología señalada con anterioridad, la cual permite abrir la experiencia



Figura 5.1: Bosquejo metodológico inicial propuesto

en la investigación del comportamiento del titanio al ser maquinado y la influencia que tienen cada uno de sus parámetros en este proceso. Ésta metodología es base para la realización de esta tesis doctoral.

Para el estudio práctico lo primero que se realiza es seleccionar el material que se va a emplear para el análisis, haciendo un estudio abductivo del conocimiento generado a través del estado del arte del proceso de maquinado de dicho material. A la par se verifica el estado actual obteniendo información por dos vías:

1. por métodos inductivos se analizan los parámetros de corte utilizados incluyendo avance, velocidad, refrigerantes, herramientas, profundidad, material removido, recubrimientos de herramientas y
2. se realizó a la vez una búsqueda deductiva a través de diversos proveedores, para así generar un conocimiento experimental.

Por otro lado se comenzó con el proceso de aprendizaje dado por la utilización de

parámetros anteriores así como incluir información proporcionada por otros autores. El conjuntar toda esta información llevó a tener los puntos clave del proceso de maquinado y a profundizar en el comportamiento que tiene el titanio referido por los autores. Para las pruebas lo primero fue elegir el proceso de preparación, es decir, condiciones de corte, equipo de prueba, lugar a realizar, qué se va a medir, equipo de medición, material a trabajar, para comenzar con el proceso de producción de datos que ayuden a la realización de las pruebas y análisis de los datos por medios científicos y comprobación práctica de los resultados aplicando las herramientas estadísticas y de sistemas inteligentes requeridos. Todo este proceso es mostrado en la Figura 5.2, la cual engloba un diagrama genérico donde se incluyen los métodos abductivos, inductivos y deductivos de análisis a los diferentes puntos importantes de la metodología específica.

La selección de parámetros a utilizar es el punto más importante de un proceso productivo. Para el estudio de este trabajo se dividirá en 3 categorías.

- a.- **Máquina.-** Lo relacionado al equipo que se utilizaría tal como torno, centro de maquinado, refrigerante y su aplicación en caso de ser necesaria. Otros parámetros que afectan al equipo de maquinado son vibración o desplazamiento y temperatura.
- b.- **Herramental.-** Las geometrías de herramientas, materiales, recubrimientos, ángulos de ataque, virutas, la fricción del material con la herramienta, el desplazamiento que genere la herramienta al estar en contacto con el material.
- c.- **Condiciones de corte.-** Comprende la cantidad de remoción de material que les da profundidad, el avance y la velocidad de corte.

Estos parámetros generan métricos de los que pueden destacarse los siguientes: vibración o desplazamiento, vida útil, temperaturas, rugosidades, caracterización de viruta, los cuales se pueden predecir y optimizar con diferentes métodos. Éstos parámetros tienen un papel muy importante en el proceso de manufactura y es vital su optimización, ya que

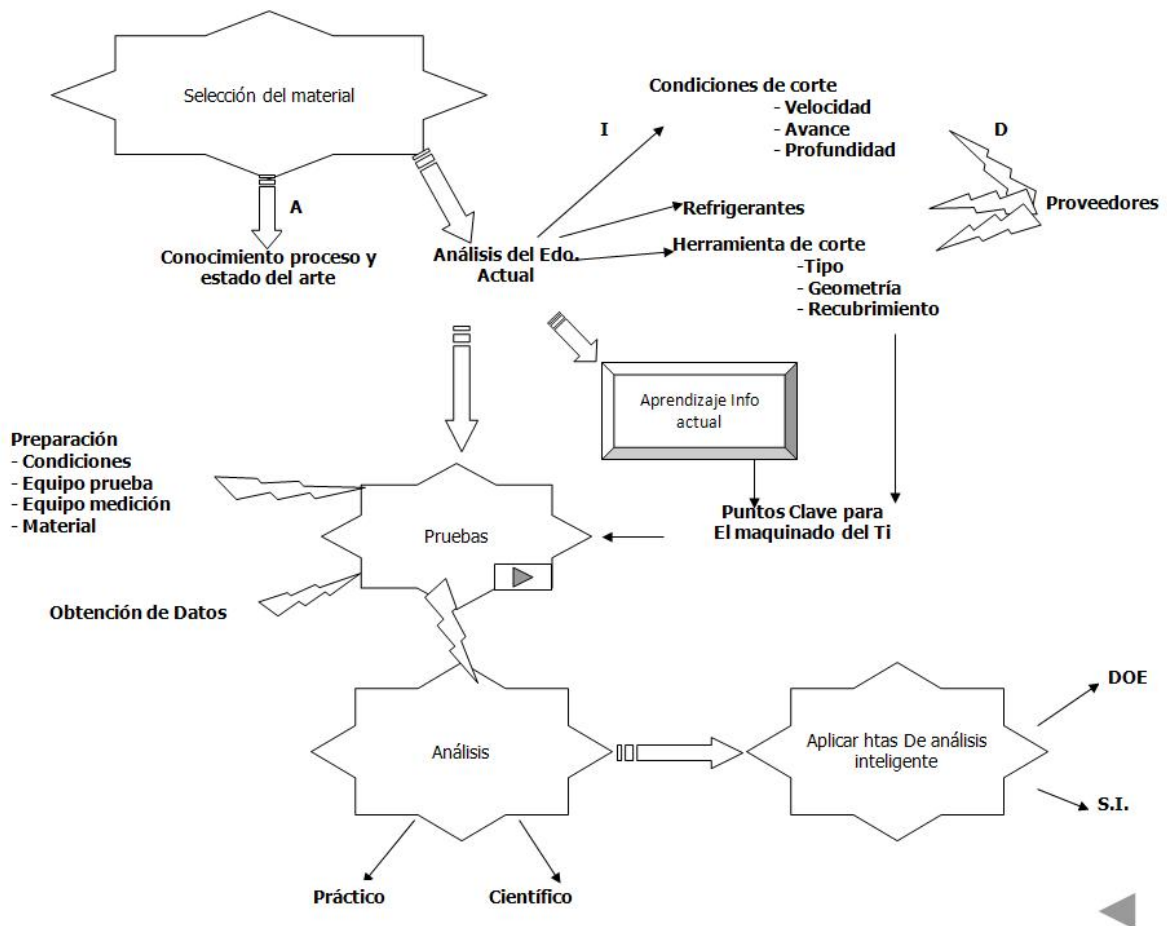


Figura 5.2: Diagrama general donde incluyen los 3 métodos principales de análisis



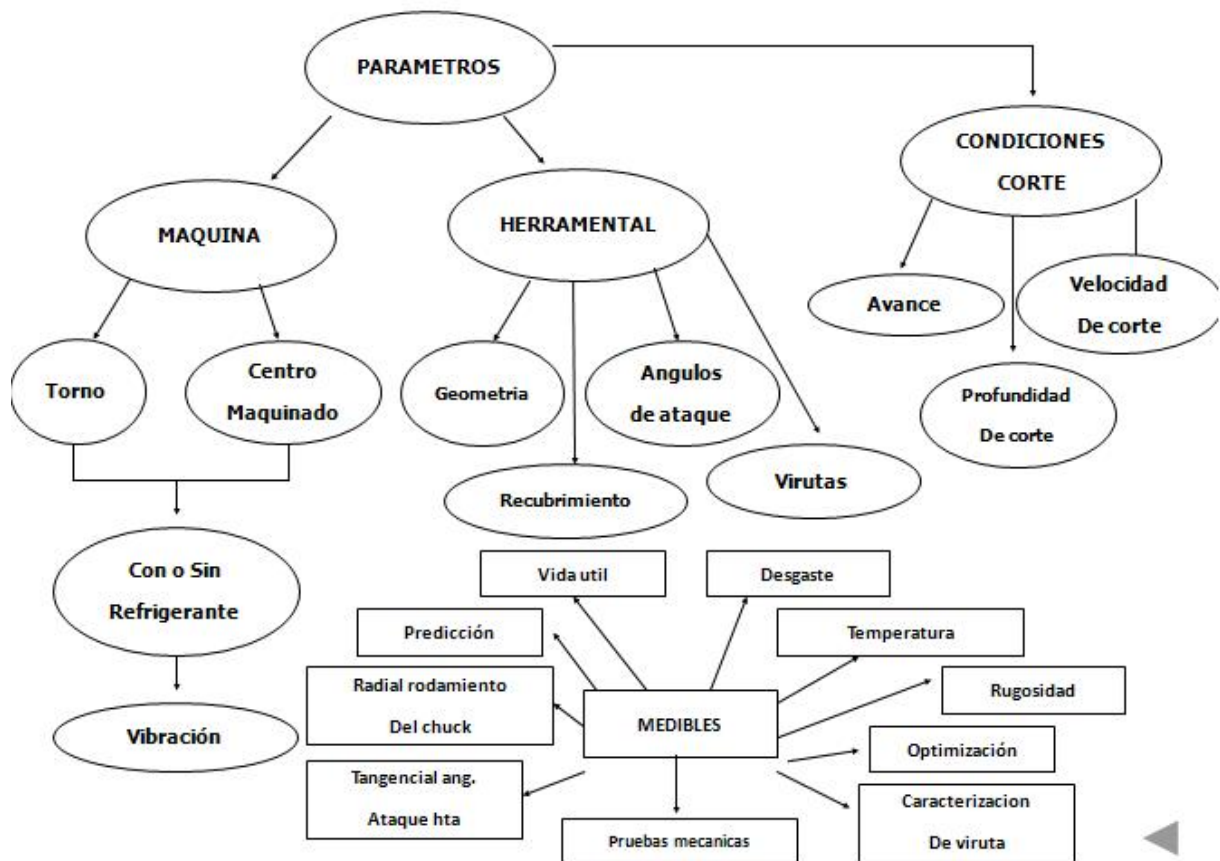


Figura 5.3: Variables importantes en un proceso de maquinado y métricas a analizar

con ésta se pueden obtener costos y tiempos de desarrollo de productos que lleven a las compañías de clase mundial a ser competitivas y figurar en los mercados como empresas líderes en fabricación y desarrollo de productos a través de procesos de maquinado altamente mejorados y eficientes. El proceso de maquinado en sus puntos principales está detallado en la Figura 5.3.

En resumen los pasos que se realizan en la obtención de parámetros de maquinado para el titanio son:

1. Revisión bibliográfica exhaustiva, la cual establece el estado del arte de lo relacionado con celdas de manufactura, máquinas de control numérico, parámetros de corte y

sus estudios, variables evaluadas en el proceso de maquinado, sistemas inteligentes e interacción de los mismos en los términos descritos con anterioridad.

2. Determinación de la situación actual realizada en el lugar de estudio para la selección de los pasos necesarios para obtener las mejores herramientas utilizables en el análisis de las variables de entrada.
3. Estudio de sistemas inteligentes, analizando parámetros obtenidos por fuentes bibliográficas, tales como la tesis de maestría y artículos relacionados a optimización de parámetros, con el fin de desarrollar la habilidad y obtener punto de referencia teóricos que faciliten la limitación de parámetros a evaluar, así como de los sistemas inteligentes que conlleva a mejores resultados.
4. Involucramiento del personal experto en FRISA Forjados S.A. de C.V., FIME y COMIMSA con el objetivo de crear un equipo multidisciplinario que pueda generar ideas con el propósito de obtener esa experiencia y reflejarla en los estudios a realizar, así como la firma de acuerdos de confidencialidad y trabajo en conjunto de las partes involucradas.
5. Detalles de características de equipo a utilizar para el análisis de su proceso, herramienta necesario y condiciones de corte, para la determinación de las variables que influyen en el proceso de maquinado tales como vibración, refrigerantes, geometría, recubrimientos, ángulos de ataque y desgaste de la herramienta, método de sujeción con lo cual se pueda llevar a cabo el proceso de evaluación.
6. Escoger el material a trabajar para el estudio, el cual permitirá determinar de forma sencilla la influencia de las variables envueltas en el proceso de maquinado, así como determinar dimensiones de trabajo y generación de las probetas a esas dimensiones
7. Caracterización del material para rectificar que la selección del material y herramientas ha sido la correcta a través de la compañía FRISA Forjados S.A. de C.V.

8. Seleccionar tipos de maquinado y trayectorias necesarias para llevar a cabo el proceso y determinar las variables con mayor afectación a proceso y cómo separarlas para su análisis
9. Realizar maquinado de probetas y toma de datos en línea que se utilizarán para llevar a cabo el estudio (temperatura y vibración o desplazamiento).
10. Realizar la evaluación de la rugosidad, que es otra característica crítica en la pieza para la determinación de la optimización de los parámetros de maquinado, así como el acabado dimensional de la pieza producida.
11. Hacer inferencia estadística y correlación entre los parámetros analizados y los resultados obtenidos con ellos para compararlos con los resultados dentro de un proceso tradicional.
12. Generación del sistema inteligente que permita analizar las necesidades importantes del cliente para considerarlas como variables de entrada, optimizarlas y con ello tratar de asegurar que las variables de salida sean las ideales.
13. Comparar los resultados obtenidos en dicho sistema con los evaluados por medio de la estadística y los tradicionales con lo cual se garantiza que el sistema está generando parámetros depurados y garantizar un nivel de competencia elevado. Esto se puede evaluar a través de la realización de pruebas con los parámetros mejorados obtenidos con el sistema inteligente.
14. Realización de la metodología a seguir para concentrar el trabajo en la elaboración de nuevas piezas que permitan garantizar los resultados adecuados del proceso de maquinado.

# Capítulo 6

## Experimentación

En este capítulo se detallan las pruebas para medir la efectividad de las herramientas de corte, el efecto del lubricante, en las corridas realizadas. El material que se utilizó fue Ti 6Al-4V, con el objetivo de probar diferentes velocidades de corte, avance y profundidades las cuales generan distintos acabados en las piezas, así como temperaturas de corte al momento de realizar el maquinado y diferentes movimientos en la pieza y herramienta medidos a través de un multianalizador. Cabe destacar que se utilizan diversos tipos de herramientas con varias cantidades de filos de corte ya que en el proceso de fresado se requieren mayores esfuerzos en los filos. En estas pruebas se evalúa más de una variable de entrada que está involucrada en el proceso de corte.

La nomenclatura, unidades y fórmulas utilizadas para las variables del proceso de fresado utilizadas para la tesis son mostradas en la Tabla 6.1.

Los equipos utilizados así como el modelo y la marca se presentan en la Tabla 6.2, los datos técnicos de los equipos se muestran en el Anexo A.

En toda investigación se debe realizar un diseño de experimentos para recabar la información que requiere el problema, para poder hacer un estudio de manera ordenada y con ello obtener un análisis objetivo y completo que lleve a conclusiones validas según el problema planteado, es decir obtener la mayor cantidad de información con el costo

Tabla 6.1: Variables en el proceso, unidades y fórmulas

Nomenclatura	Variable	Unidades	Fórmulas
<b>V</b>	Velocidad	m/min	*
<b>f</b>	Avance	mm/rev	*
<b>p</b>	Profundidad	mm	*
<b>L</b>	Long. de corte	mm	*
<b>l</b>	Ancho de corte	mm	*
<b>n</b>	Velocidad de giro	Rev/min	$1000 * V / (\pi * d)$
<b>t</b>	Tiempo	Seg	$(L / (n * f)) * 60$
<b>d</b>	Diámetro	mm	*
<b>MRR</b>	Tasa de remoción de material	mm <sup>3</sup> /min	$V * f * p$
<b>Temp</b>	Temperatura de corte	°C	*
<b>Ra</b>	Rugosidad media	μm	$(1/n)(\sum  Datos )$
<b>D</b>	Desplazamiento	μplg	$318.5(\text{velocidad}) / \text{frecuencia}$
<b>D</b>	Desplazamiento	μplg	$27668(\text{aceleración}) / \text{Frecuencia}^2$
<b>A</b>	Aceleración	Gz	$0.01146(\text{velocidad})(\text{frecuencia})$

Tabla 6.2: Equipo utilizado para las pruebas

<b>Equipo</b>	<b>Modelo</b>	<b>Marca</b>
<b>Rugosímetro</b>	Surfcom 1500SD2	CARL ZEISS
<b>Pirómetro Infrarrojo</b>	574_	FLUKE
<b>Centro de Maquinado Vertical CNC</b>	760 VCM	BRIDGEPORT
<b>Sujeción de herramientas</b>	CAT 45	KENNAMETAL
<b>Herramienta de corte (Endmil)</b>	ZH1C 3/8 TI-NAMITE-A Z CARB(TM) 4 FL	SGS Solid Carbide Tools
<b>Herramienta de corte (Endmil)</b>	ZH1C 3/8 TI-NAMITE-A Z CARB(TM) 5 FL	SGS Solid Carbide Tools
<b>Herramienta de corte (Endmil)</b>	ZH1C 5/16 TI-NAMITE-A Z CARB(TM) 4 FL	SGS Solid Carbide Tools
<b>Lubricantes</b>	Sintetico	MILACRON
<b>Multi analizador</b>	Pulse 3560B	BRUEL&KJAER
<b>Material</b>	6 Al 4 V	TITANIO
<b>Software</b>	Estadístico	MINITAB
<b>Software</b>	Programación	MAT LAB
<b>Software</b>	Temperatura	IR Graph
<b>Software</b>	Rugosidad	TIMS
<b>Software</b>	Desplazamiento	PULSE

Tabla 6.3: Diseño de experimentos

Condición	Unidades	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
<b>Refrigerante</b>	Sin/Con	0	1	*
<b>Herramienta</b>	Filos*diámetro	1.5	1.875	*
<b>Velocidad</b>	m/min	70	80	90
<b>Velocidad de Corte</b>	RPM	2228	2546	2865
<b>Avance</b>	mm/rev	0.11	0.13	0.15
<b>Profundidad</b>	mm	0.5	1	1.5

mínimo. Para esta tesis se decidió hacer un diseño factorial general completo: primero se escogieron los factores que formarían parte del estudio y se determinaron los niveles de cada uno de ellos, los cuales se presentan en la Tabla 6.3 y se realizaron 3 réplicas para poder calcular el error absoluto de los datos. El tamaño del experimento se obtiene al multiplicar todos niveles de cada uno de los factores y el resultado generado se multiplica por el número de réplicas.

Una vez obtenidos los parámetros de los experimentos a realizar se procede a preparar las muestras de las piezas para hacer las ranuras en una longitud de maquinado constante, por lo que se prepara una tabla con los parámetros para concentrar las mediciones. La Figura 6.1 muestra una parte de las pruebas realizadas en el diseño de experimentos.

Las pruebas se llevaron a cabo en un centro de maquinado vertical Bridgeport 760VCM, mostrado en la Figura 6.2. El montaje de la herramienta se realizó en un CAT 45, debido al soporte que le da el diseño, que garantiza robustez y estabilidad al momento de estar maquinando, el cual es expuesto en la Figura 6.3.

La herramienta que se utilizó es un "end mill" de la compañía SGS con acabado en alonitruro de titanio (Ti-NAMITE-A (AlTiN)) en diferentes diámetros y filos cortantes. El primero de ellos es un diámetro de corte ( $d_1$ ) de 0.3125(5/16) con 4 dientes de corte,

Figura 6.1: Muestra de pruebas del diseño de experimentos

Prueba	Diseño de experimentos				
	Lubricante	Herramienta	Speed	Feed	Depth
1	sin lubri	3/8" 4 filos	2228	0.11	0.5
2	sin lubri	3/8" 4 filos	2228	0.11	1.0
3	sin lubri	3/8" 4 filos	2228	0.11	1.5
4	sin lubri	3/8" 4 filos	2228	0.13	0.5
5	sin lubri	3/8" 4 filos	2228	0.13	1.0
6	sin lubri	3/8" 4 filos	2228	0.13	1.5
7	sin lubri	3/8" 4 filos	2228	0.15	0.5
8	sin lubri	3/8" 4 filos	2228	0.15	1.0
9	sin lubri	3/8" 4 filos	2228	0.15	1.5
10	sin lubri	3/8" 4 filos	2546	0.11	0.5
11	sin lubri	3/8" 4 filos	2546	0.11	1.0
12	sin lubri	3/8" 4 filos	2546	0.11	1.5
13	sin lubri	3/8" 4 filos	2546	0.13	0.5
14	sin lubri	3/8" 4 filos	2546	0.13	1.0





Figura 6.2: Bridgeport VMC 760

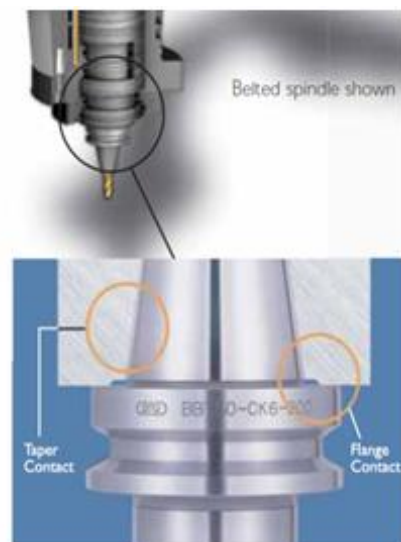


Figura 6.3: Sistema de sujeción CAT 45

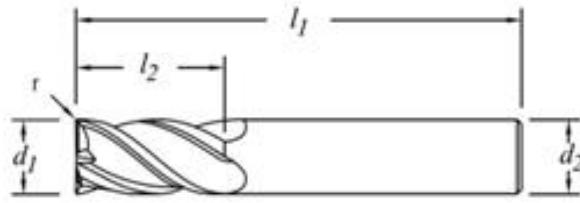


Figura 6.4: Herramienta de corte (End Mill)

una longitud de corte ( $l_2$ ) de  $0.8125(13/16)$ , una longitud total ( $l_1$ ) de  $2.5(2\frac{1}{2})$  pulgadas, diámetro del cuerpo del cortador ( $d_2$ ) de  $0.3125(5/16)$ , un radio de esquina ( $r$ ) de  $0.015(1/64)$  a  $0.02(1/50)$  pulgadas y con un número de identificación 36571. Estas herramientas son de la serie *ZH1CR/ZH1MCR* usados para aleaciones de alta temperatura con un radio de esquina, también se manejó con un diámetro de corte de  $0.375(3/8)$  con 4 dientes de corte, una longitud de corte de  $0.875(7/8)$ , una longitud total de  $2.5(2\frac{1}{2})$  pulgadas, diámetro del cuerpo del cortador de  $0.375(3/8)$ , un radio de esquina de  $0.015(1/64)$  a  $0.02(1/50)$  pulgadas y con un número de identificación 36572 de la misma compañía. Este último se utilizó con 5 dientes de corte para evaluar también el comportamiento de los filos cortantes en el proceso, el dibujo del end mil con todas sus dimensiones especificadas se encuentran en la Figura 6.4. Para las pruebas se utilizaron piezas rectangulares de Ti 6Al-4V con una medida mostrada en la Figura 6.5. Las piezas rectangulares tenían una dimensión de largo a 125mm, de ancho a 47mm y de altura 22mm, para poder optimizar el material disponible.

En el maquinado o corte de metal el principal parámetro negativo es el calor generado. Debido a que pueda presentarse temperaturas elevadas durante el maquinado que pueden provocar daños en la herramienta de corte o modificar las dimensiones de la pieza con la que se está trabajando, el fluido de corte logra reducir el calor enfriando la pieza y lubricarla o crear una película del mismo lubricante entre la superficie de la viruta y la herramienta de corte. Durante el maquinado mucha energía se pierde debido a la fricción,

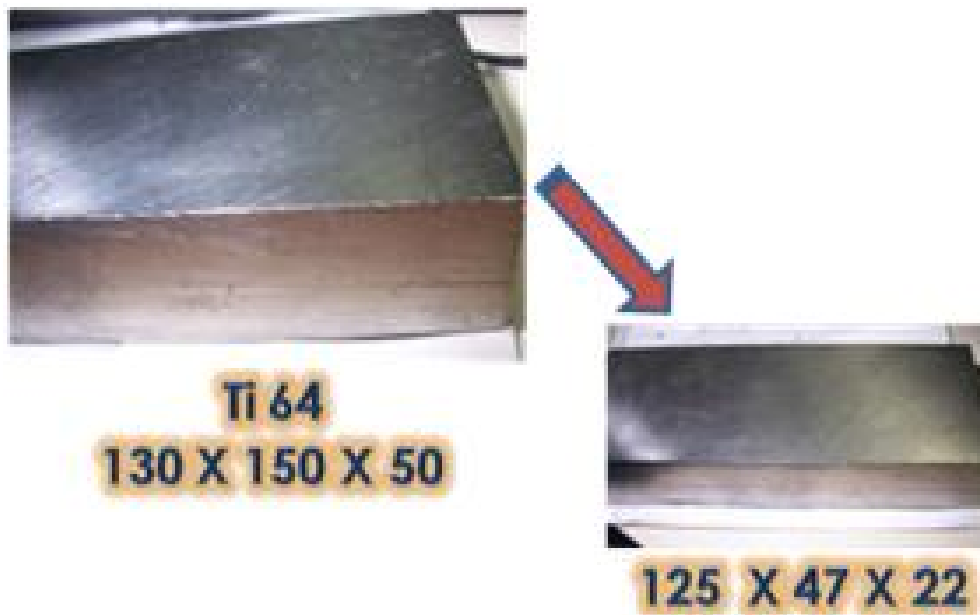


Figura 6.5: Pieza de Ti 6Al-4V

la cual se presenta al momento de estar en contacto la herramienta con el material y se produce el rozamiento que lleva al desprendimiento de la viruta, con lo cual los átomos en la pieza de trabajo liberan calor (ver Figura 6.6) y lo que hace el fluido de corte es enfriar esa superficie, mediante extracción del calor causado por la fricción (ver Figura 6.7).

El calor que se genera en un proceso de corte de metal va a depender del tipo de material que se éste maquinando. Se genera menor calor al cortar metales con una baja resistencia a la tensión tales como el latón o el aluminio, pero en metales como el titanio o el acero inoxidable es más el calor generado al cortarlos debido a su alta resistencia a la tensión. Otro factor que promueve un mayor nivel de calor es la velocidad de corte con respecto a la cual se trabaja; entre más elevada se ésta, mayor es la necesidad de enfriamiento. En cambio en los procesos con velocidades de corte lentas se requiere una mayor lubricación en lugar de enfriamiento.

El maquinado genera altas temperaturas y presiones lo cual provoca a la herramienta un



Figura 6.6: Fricción produciendo calor



Figura 6.7: Fluido de corte eliminando el calor del rozamiento entre la herramienta y la pieza de trabajo

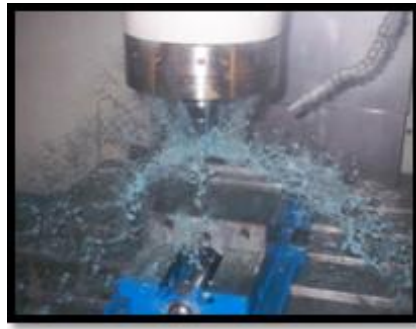


Figura 6.8: Lubricación a través de un anillo distribuidor de refrigerante

borde acumulado (BUE). Los lubricantes de corte se pueden clasificar en 2 categorías que son:

- o Aceites íntegros de corte.- Estos lubricantes están basados en aceite mineral y no contienen agua. Los aceites de corte se pueden dividir en aceites íntegros de corte inactivos y activos

- o Fluidos miscibles con agua.- Estos lubricantes tienen una combinación de líquidos, por lo general agua y aceite y están catalogados en orgánicos, sintéticos y semi-sintéticos por lo general contienen volúmenes de 90 a 95% de agua.

La forma de aplicar el fluido de corte en las pruebas realizadas en este trabajo fue a través de un anillo distribuidor donde el lubricante se lleva a través de un tubo circular con orificios, los cuales distribuyen el fluido alrededor de la circunferencia de la herramienta de corte tal como lo muestra la Figura 6.8

Un punto importante son las propiedades del agua que se usa en los fluidos miscibles con agua, la dureza del agua es un índice de qué tanto calcio o magnesio tiene el agua, el pH que indica su acidez o alcalinidad.

Dentro de los parámetros de corte (variables de entrada) tienen en común códigos de maquinados realizados en control numérico computarizado (CNC), al realizar el programa todos los movimientos son iguales para todas las mediciones y se realizan varios en una sola pieza de trabajo, solo se corrigen los valores de las variables de entrada hablando de velocidad, avance, profundidad de corte, el uso de lubricante. En la figura 6.9 se muestra un diagrama de flujo del procedimiento seguido en el desarrollo del código de CNC. El programa de control numérico esta compuesto de tres partes:

- 1) El encabezado, que es la parte donde se le indica a la máquina la manera en la que se va a estar trabajando.
- 2) El cuerpo del programa, que son todas las instrucciones de maquinado que le dan forma a la pieza que se esta maquinando y
- 3) El fin del programa que es la parte donde se desactivan las instrucciones que se le dieron de alta a la máquina al principio del programa.

El formato que se sigue para la codificación es en base a la norma ISO y esta formado por códigos G (para la programación de movimientos y ciclos enlatados en la máquina), M (códigos miscelaneos de la máquina) y coordenadas, los cuales se pueden ingresar de manera manual a través de un teclado alfanumérico que se encuentra en la interfaz del centro de maquinado y que ayuda a la manipulación del mismo o a través de establecer comunicación de esa interfaz con una computadora utilizando paquetes computacionales de alta tecnología para llevar a cabo dicha comunicación. Para esta tesis se seleccionó la primera opción que consiste en desarrollar el programa de manera manual e introducirlo a través de la interfaz, ya que su complejidad es reducida y a que se evalúan solo trayectorias rectas y los efectos que produce proceso de maquinado lineal en el acabado superficial, la temperatura, etc.

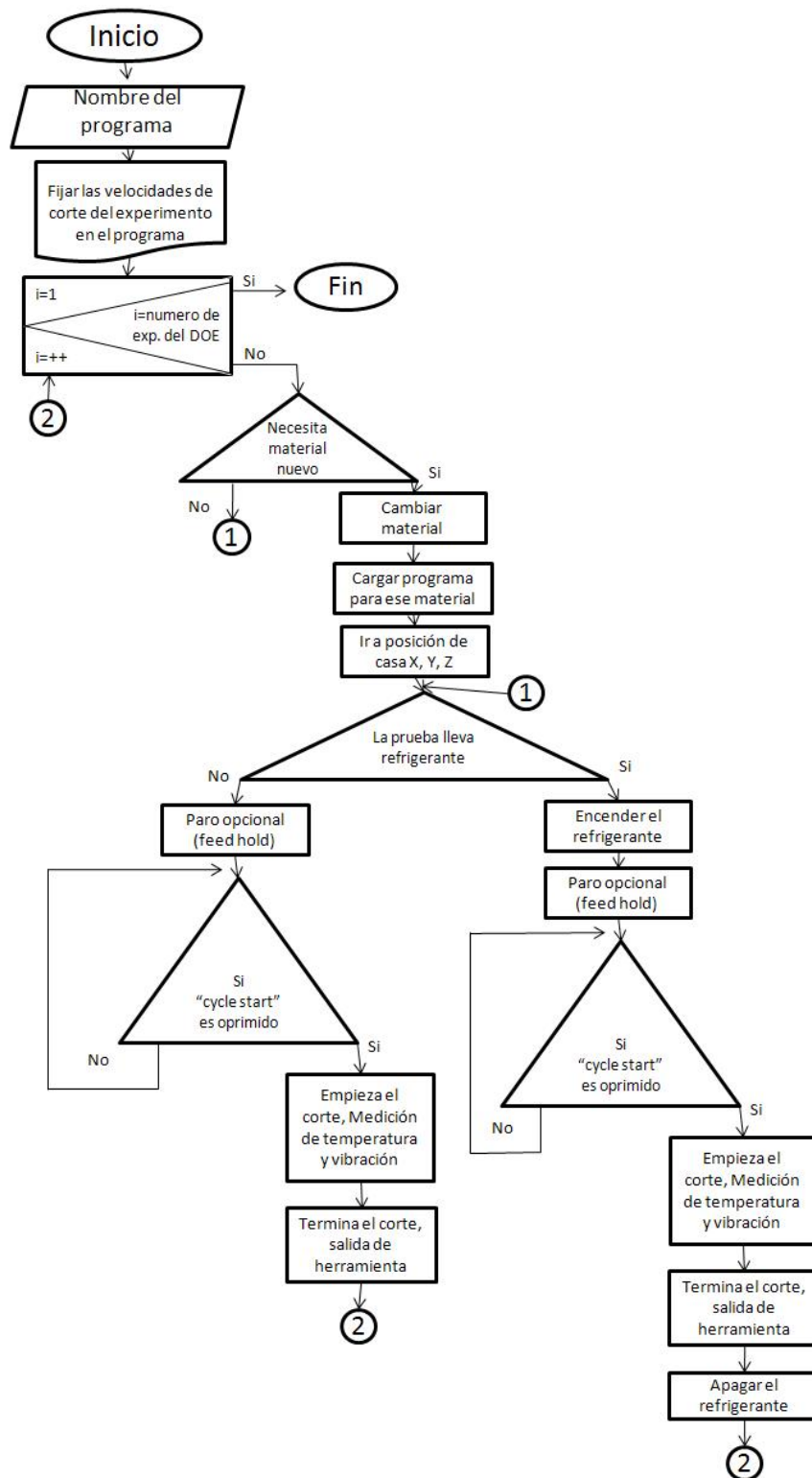


Figura 6.9: Diagrama de flujo de los pasos del programa de control numérico computarizado

Los pasos seguidos después del desarrollado del programa y su introducción a la máquina se enlistan a continuación:

1. Calcular el cero de pieza de trabajo.
  - a) Definir la posición del cero de pieza, para las pruebas se ubicará en la esquina superior izquierda de la pieza de titanio.
  - b) Con la herramienta se calculan el valor de  $X$  y de  $Y$  considerando el radio de la herramienta para posicionar el punto cero en el centro del husillo de la misma.
  - c) Seleccionar el cero de pieza que se utilizará en la pantalla de compensación. Los valores obtenidos de  $X$  y  $Y$  se colocan en la posición del compensador de pieza que se vaya a utilizar. Esta máquina cuenta con 40 compensadores de pieza que se pueden programar directamente en la codificación de control numérico y uno que se puede programar externo.
  - d) Se verifica el valor obtenido en el modo semiautomático denominado "MDI".
  - e) Se define la posición de cero de pieza para el eje  $Z$ , para este caso sería en la parte superior de la pieza de titanio.
  - f) Se obtiene el cero de pieza de trabajo en el eje  $Z$  considerando como base el plano recto del cabezal de la torreta de herramientas sin herramienta en él y con ayuda de una placa de dimensión conocida la cual se ubica en la posición de cero de la pieza de trabajo.
  - g) Se anexa el valor obtenido de la coordenada  $Z$  más la dimensión de la placa utilizada para el análisis en la posición  $Z$  del compensador de pieza seleccionado con anterioridad.
  - h) Una vez hechos los pasos anteriores se verifica que el procedimiento se haya realizado de manera correcta, programando lenguaje de CNC en el teclado alfanumérico de la máquina en el modo semiautomático de trabajo.



2. Calcular el cero de herramienta, el cual sirve para que la máquina reconozca la longitud de herramienta que se está utilizando y con ello evitar colisiones al momento de maquinar.
  - a) Montar la herramienta de trabajo.
  - b) Se posiciona la punta de la herramienta sobre la posición de cero de pieza de trabajo y se verifica en la pantalla la dimensión de centro de maquinado.
  - c) Se anota el valor obtenido en la pantalla de compensación en el apartado de herramientas, se busca el número de la herramienta y se pone en longitud el valor obtenido.
  - d) Se posiciona en el modo semiautomático se comprueba que los valores calculados hayan sido los correctos.
3. Comprobación del programa de pieza.
  - a) Se realizar una corrida en el aire, sin pieza de trabajo para verificar que el programa y la interacción con la interface haya sido correcta, así como los desplazamientos en los ejes y los signos de las coordenadas.
4. Una vez verificado el nuevo programa y el cero de pieza y herramienta se procede a realizar las pruebas del diseño de experimentos.

## 6.1. Medición de Datos.

### 6.1.1. Rugosímetro

El equipo utilizado para la medición de la rugosidad fue un equipo de medición controlado a través de CNC. El modelo del equipo es Surfcom 1500SD2 de la marca Carl Zeiss (ver Figura 6.10), este equipo cuenta con un detector o palpador que tiene una punta de diamante de aproximadamente  $1 \mu m$  la cual tiene una polaridad positiva. Mediante este



Figura 6.10: CNC Surfcom 1500SD2

equipo se pueden medir diferentes rangos de medición y para este estudio se seleccionó el de  $\pm 500\mu m$ , se utilizó una longitud de onda de corte de 0.8mm. La longitud de onda de muestreo es 5 veces la longitud de corte por lo que la longitud de muestreo usada en estas pruebas fue de 4mm utilizando la norma o estándar ISO-97. La velocidad de medición que se utilizó fue de 0.15mm/seg y la velocidad de desplazamiento de 3.0mm/seg, el recorrido pre/pos utilizado fue  $Corte/3 * 2$  y la relación de corte  $L_s$  fue de 300, para la longitud de onda corte  $L_s$  se usaron  $2.6667\mu m$ . El tipo de corte usado en la medición fue el gaussiano y la corrección de la inclinación fue a través de Menor Cuadrado Recto. La altura que mantiene el palpador sobre la probeta, la cual es controlada por el paquete computacional esto garantiza la repetitividad para la medición



Figura 6.11: Pirómetro Fluke

### 6.1.2. Pirómetro Infrarrojo

El pirómetro infrarrojo utilizado para este experimento es el modelo Fluke 574, con un intervalo de medición de temperatura que oscila entre 30 y 900°C, este aparato se conectó a una computadora la cual recibiría la señal digital generada por el mismo a través de un puerto de datos RS232. En la computadora se utilizó el programa *IR – Graph* que es el que permite la interacción entre el pirómetro y dicha computadora, la velocidad de muestreo con la que se efectuaban las mediciones de temperatura fue cada 0.125 seg, se programó el pirómetro para enviar una señal de medición promedio en cada lectura y se alimentó el coeficiente de emisividad del titanio que fue de 0.1. El pirómetro fue colocado en un trípode a un metro de la herramienta por la parte lateral del centro de maquinado, removiendo la guarda que tenía el centro para poder realizar la medición de manera correcta (ver Figura 6.11), se colocó de tal manera que durante todo el recorrido los puntos infrarrojos que emite el pirómetro estuvieran centrados en el área que se estaba maquinando. El pirómetro genera datos de temperatura contra el tiempo como se muestra en la Figura 6.12 y se midió este parámetro para cada uno de los experimentos del diseño con todos los cambios en los parámetros a estudio.

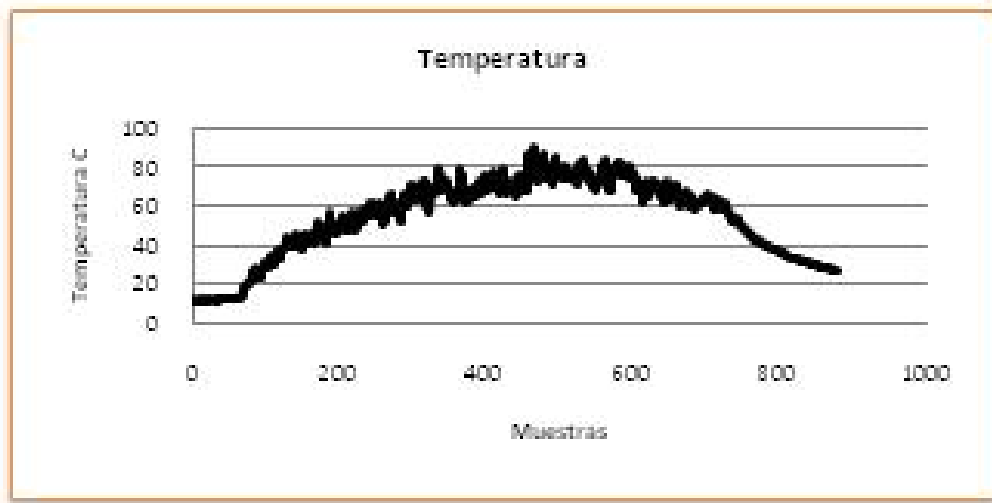


Figura 6.12: Medición de temperatura

Se hizo un análisis de temperatura para verificar temperatura máxima, temperatura mínima y temperatura promedio.

### 6.1.3. Multianalizador de Señales

El multianalizador de señales utilizado para este experimento es el modelo PULSE 3560 B. Se trata de una unidad de adquisición de datos con 5 canales de entrada y un canal de salida, con un intervalo de medición de 25.6kHz. Éste aparato se conectó a una computadora la cual recibiría la señal digital generada por él mismo a través de un puerto de datos USB. En la computadora se utilizó el programa *PULSE LR* que es el que permite la interacción entre el multianalizador y dicha computadora. Generando mediciones en 8 versiones, 4 estándares y 4 Dyn-X.

El multianalizador de señales fue colocado en el extremo derecho del material y fue adherida una pieza de plástico utilizando un pegamento especial denominado LOCTITE 330 así como la unión de un activador conocido como LOCTITE 7387, los cuales permiten



Figura 6.13: Multianalizador PULSE 3560B.

que el material sea añadido con firmeza para realizar la medición sin crear ruido en la misma y con ello se asegura la repetibilidad de las mediciones. En esa placa plástica especial se colocó el analizador de señales, y el cable que comunicaba a la computadora fue extraído de la máquina por la parte lateral del centro de maquinado, removiendo la guarda que tenía el centro de maquinado para poder realizar la medición de manera correcta (ver Figura 6.13). El analizador genera un espectro de datos de desplazamiento contra el tiempo, que es medido cada 20 milisegundos por un periodo de 16 segundos como se muestra en la Figura 6.14 y se midió este parámetro para cada uno de los experimentos del diseño con todos los cambios en los parámetros a estudio.

Se hizo un análisis de desplazamiento para revisar la suma, el máximo, mínimo y el promedio del desplazamiento.

#### 6.1.4. Cúmulo de partículas

Para el desarrollo del análisis de las variables a través del algoritmo de cúmulo de partículas el primer paso fue introducir los valores de cada medición a una red neuronal

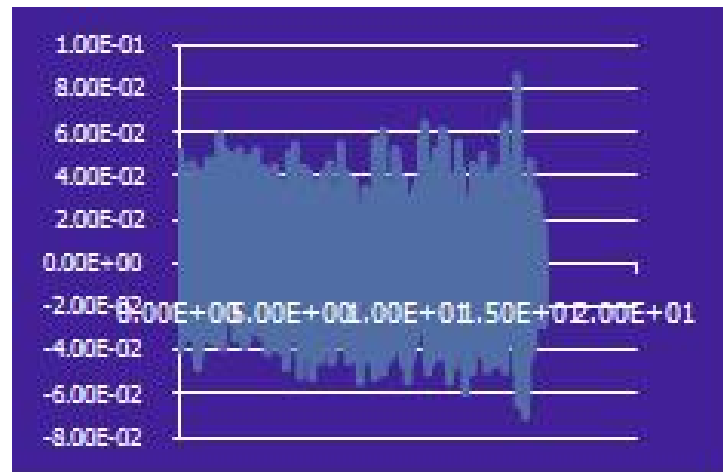


Figura 6.14: Medición de desplazamiento.

de retropropagación con el objetivo de predecir el comportamiento del proceso en todo su comportamiento incluyendo valores no considerados en el experimento, pero de manera individual cada una de las variables a analizar, para que esta red sirviera como función objetivo al momento de hacer los análisis en el cúmulo de partículas. La red neuronal así como el cúmulo de partículas fueron programados en MATLAB-R2008b®; en la Figura 6.15 se muestra un diagrama con una perspectiva general del análisis seguido para la aplicación de la red neuronal de retropropagación considerando todos los parámetros de entrada e independientes, y los parámetros de salida para de ahí llevarlas a la optimización multiobjetivo a través del cúmulo de partículas.

Los parámetros de entrenamiento utilizados para la red neuronal se desglosan en la Tabla 6.4, las neuronas de entrada son neuronas que reciben datos o señales procedentes del entorno en este caso las variables a estudiar en el proceso de maquinado, las neuronas de la capa oculta son las que ayudan a los cálculos, sería el órgano de cómputo en la red neuronal, no tiene conexión directa con el entorno. Este tipo de capas le dan grados de libertad adicionales con los cuales se pueden encontrar representaciones internas semejantes a los rasgos del entorno, además extraen información de la capa de entrada y

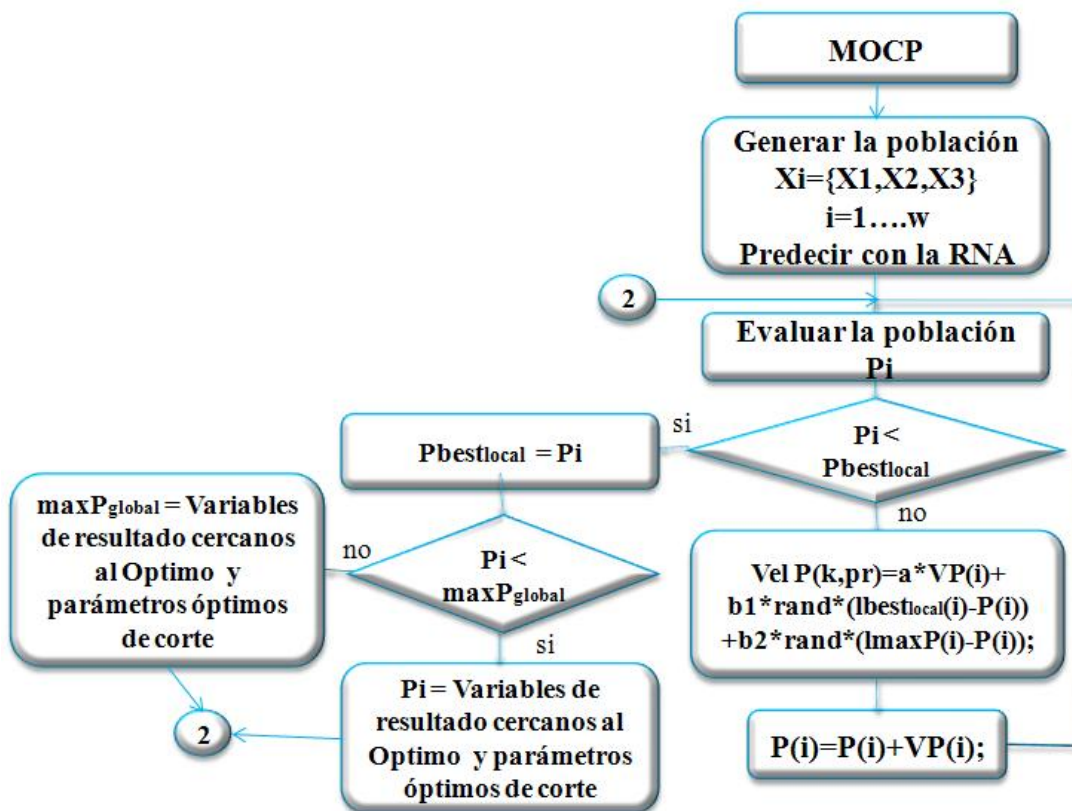
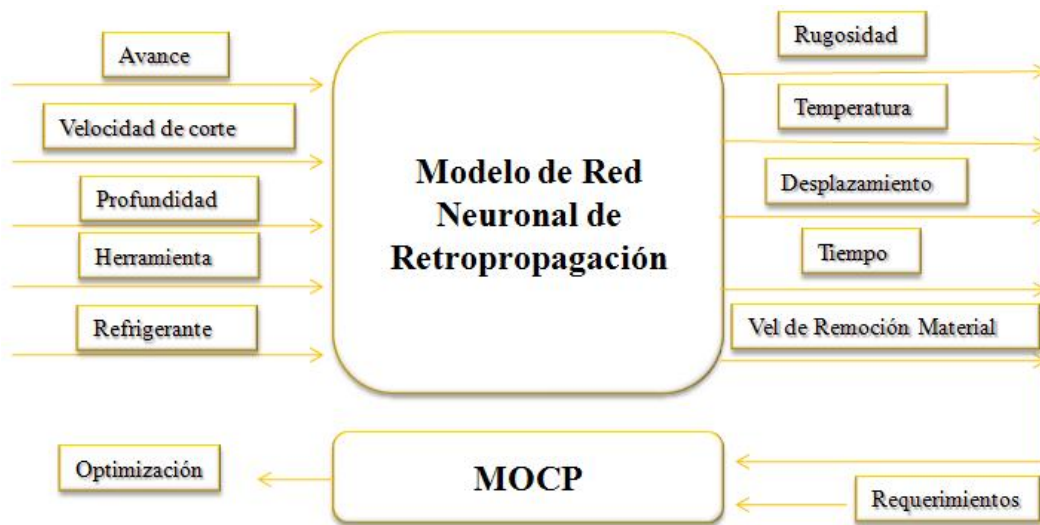


Figura 6.15: Diagrama que muestra la metodología seguida a través de las redes neuronales y optimización por cúmulo de partículas

Tabla 6.4: Variables de la red neuronal.

Variable	Descripción
Tinp	Neurona en la capa entrada
Tmid	Neuronas de la capa oculta
Tout	Neurona en la capa salida
Eta	Constante de aprendizaje
Alpha	Momento
Ntepochs	Ciclos

Tabla 6.5: Variables del cúmulo de partículas.

Variable	Descripción
NTI	Número total de individuos
Ciclos	Ciclos para convergencia
Alpha	Dirección de la velocidad
beta1	Seguimiento al líder local
beta2	Seguimiento al líder global

proporcionan información a la capa de salida. La capa de salida son las variables sensibles a la entrada dentro del estudio, es decir ahí se almacenan las respuestas en una red neuronal.

Para el cúmulo de partículas se desarrolló un programa en MatLab <sup>®</sup>, donde se consideraron como funciones objetivo las redes neuronales para cada uno de los parámetros analizados, y la fórmula de evaluación de los movimientos que tendría la parvada en los casos necesarios y con ello obtener un frente de pareto. Los parámetros utilizados para el desarrollo y análisis del frente de pareto en el cúmulo de partículas se desglosan en la Tabla 6.5.



# Capítulo 7

## Discusión y Resultados

En las Figura 7.1, Figura 7.2, Figura 7.3 se muestran las gráficas con los valores de rugosidad media de cada uno de los experimentos realizados. Cada gráfica muestra los valores de rugosidad concentrados para cada réplica de las pruebas realizadas

Después de concluir los experimentos se hizo un análisis de varianza (ANOVA) para ver si la diferencia en la calidad superficial entre varias corridas era estadísticamente significativa. Dichas pruebas se llevaron a cabo en utilizando el paquete Minitab ®. En la Tabla 7.1 se muestran los grados de libertad (DF por sus siglas en inglés), el cuadrado medio (MS) y F, asociados a un valor p para cada factor y sus interacciones. Si analizamos los valores de p se observa que la mayoría de ellos son significantes excepto por el valor de velocidad y la interacción de la velocidad con la profundidad ya que como tienen resultados mayores a 0.05 denotan que son estadísticamente insignificantes.

Los datos fueron analizados a través de una regresión lineal la cual usa estimación a través de mínimos cuadrados para obtener los coeficientes del modelo, donde el primer acercamiento se hizo con 3 regresores: la velocidad, el avance y la profundidad de corte, y se obtuvo un modelo de predicción mostrado en la Ecuación 7.1. Los resultados de los coeficientes de cada variable están en la Figura 7.4, así como el error de los coeficientes, y el valor de P, siendo importantes los valores de inflación (VIF), los cuales deben estar

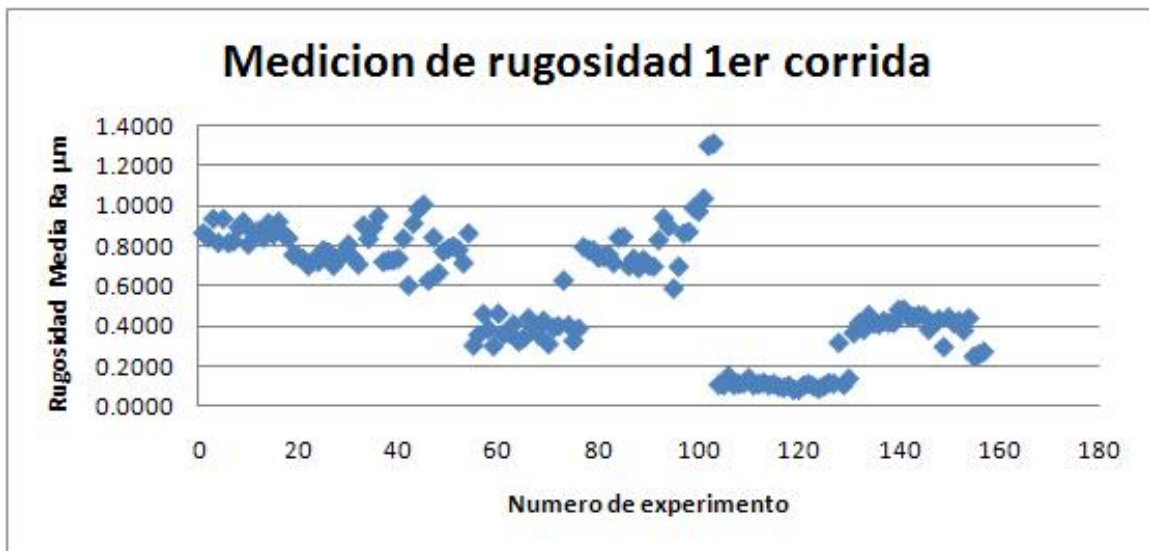


Figura 7.1: Gráficas de rugosidad en la primer corrida

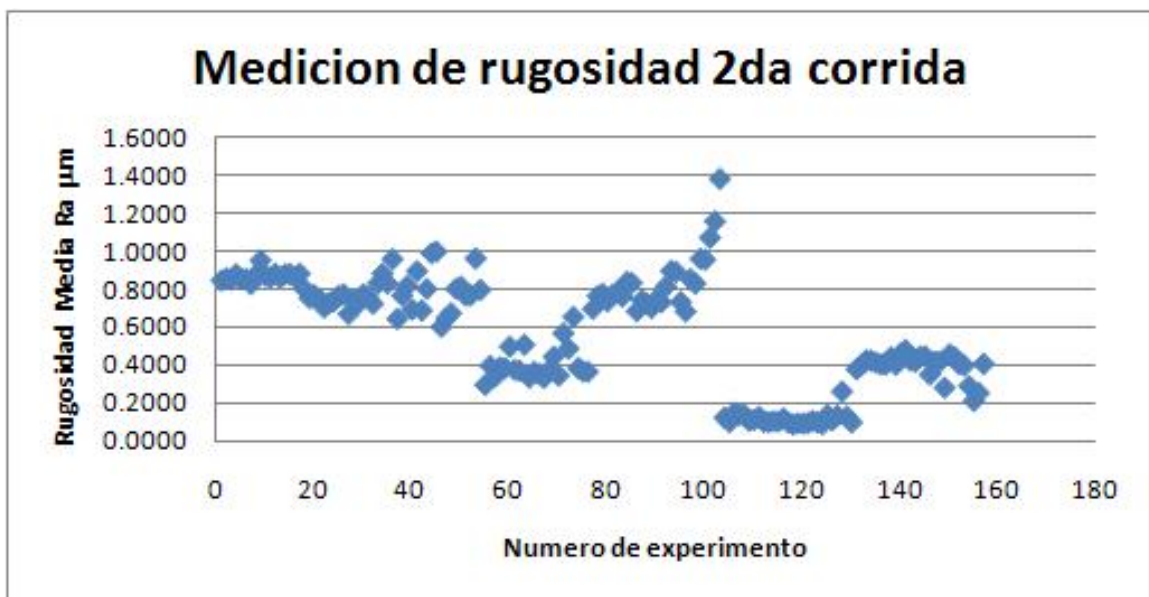


Figura 7.2: Gráficas de rugosidad en la segunda corrida

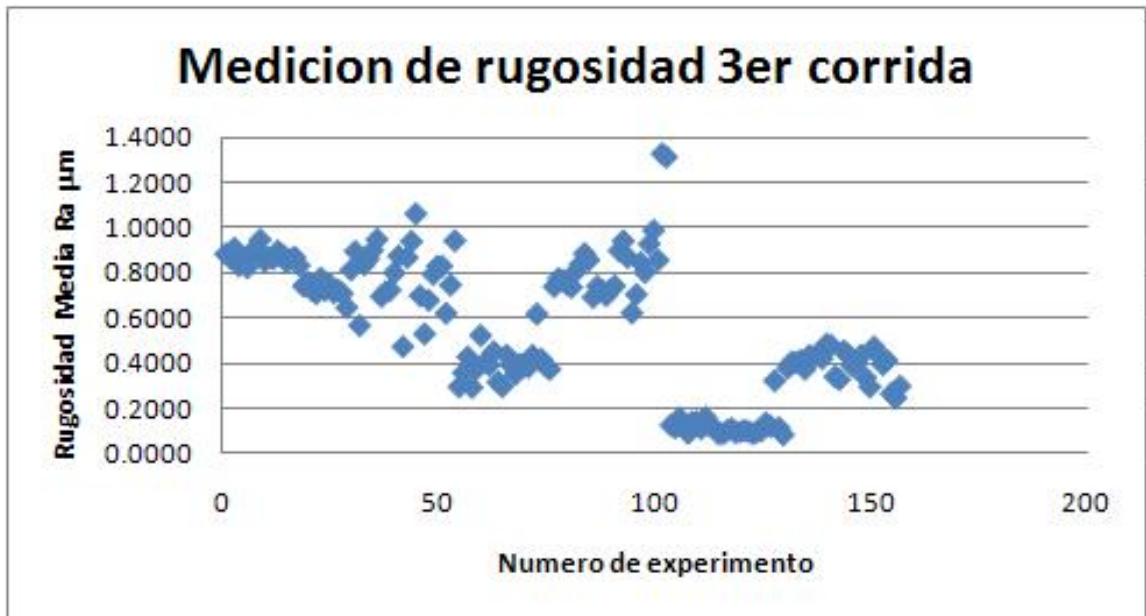


Figura 7.3: Gráficas de rugosidad en la tercer corrida

Tabla 7.1: Análisis de Varianza.

Variable	DF	MS	F	P-value
Velocidad	2	0.1547	266.39	0
Avance	2	0.0014	2.33	0.107
Profundidad	2	0.0021	3.57	0.035
vel*avance	4	0.0022	3.73	0.009
vel*prof	4	0.0024	4.12	0.006
ava*prof	4	0.0013	2.28	0.073
vel*ava*prof	8	0.0026	4.41	0
Error	54	0.0006		
Total	80			

<b>Predictor</b>	<b>Coefficiente</b>	<b>SE Coeficiente</b>	<b>T</b>	<b>P</b>	<b>VIF</b>
<b>Constante</b>	1.35323	0.06219	21.76	0	
<b>Velocidad</b>	-0.00021203	0.00001855	-11.43	0	1
<b>Avance</b>	0.0649	0.2954	0.22	0.827	1
<b>profundidad</b>	0.0026	0.01182	0.22	0.826	1

Figura 7.4: Coeficientes de regresión y valores de inflación

<b>Regresion Lineal</b>	
<b>S</b>	0.0434111
<b>R-Sq</b>	62.90%
<b>R-Sq(adj)</b>	61.50%

Figura 7.5: Ajuste del modelo de regresión lineal

en un intervalo entre 1 y 10. Si se observa la Tabla 7.4 se puede considerar que todos los valores están correctamente dentro del intervalo, pero en la Tabla 7.5 se observa el ajuste que puede lograr este modelo el cual es relativamente bajo.

$$rugosidad = 1.35 - 0.000212velocidad + 0.065avance + 0.0026profundidad \quad (7.1)$$

Para ello se hace un análisis del modelo utilizando interacciones entre los factores lo cual genera un modelo de regresión lineal múltiple, el cual está dado en la Ecuación 7.2. Al analizar los valores de inflación mostrados en la Tabla 7.6 se observa que se sale del intervalo, lo cual da estimaciones inestables indicando con ésto que magnitudes y signos puedan cambiar significativamente de una muestra a otra. A pesar de ver el ajuste mostrado en la Tabla 7.7 que aparenta estar bien.

Predictor	Coefficiente	SE Coeficiente	T	P	VIF
Constante	-1.2021	0.8539	-1.41	0.164	
velocidad	0.0024358	0.0004347	5.6	0	1217.8
avance	-15.242	6.828	-2.23	0.029	1185.1
profundidad	-1.0003	0.629	-1.59	0.116	6284.3
vel*vel	-0.00000058	0.00000007	-8.61	0	768.2
vel*avance	0.003196	0.002018	1.58	0.118	1121.7
vel*prof	0.0004754	0.0002448	1.94	0.056	6622.5
ava*ava	30.16	17.18	1.76	0.083	508
ava*prof	10.43	4.782	2.18	0.033	6817.5
prof*prof	-0.06003	0.02748	-2.18	0.032	49
vel*ava*prof	-0.00436	0.001868	-2.33	0.022	7197.8

Figura 7.6: Coeficientes de regresión múltiple y valores de inflación

Regresion con interacciones	
S	0.029152
R-Sq	84.80%
R-Sq(adj)	82.60%

Figura 7.7: Ajuste del modelo de regresión lineal con interacciones

$$\begin{aligned}
 \text{rugosidad} = & -1.20 + 0.00244\text{velocidad} - 15.2\text{avance} - 1.00\text{profundidad} \\
 & - 0.000001\text{vel} * \text{vel} + 0.00320\text{vel} * \text{avance} + 0.000475\text{vel} * \text{prof} + 30.2\text{ava} * \text{ava} \\
 & + 10.4\text{ava} * \text{prof} - 0.0600\text{prof} * \text{prof} - 0.00436\text{vel} * \text{ava} * \text{prof}
 \end{aligned}
 \tag{7.2}$$

Figura 7.8: Coeficientes de regresión ridge y valores de inflación considerando el valor de  $k=0.02$ 

<b>Variables</b>	<b>Coeficientes Regresion</b>	<b>Error Estandar</b>	<b>Coeficientes Regresion Estandarizados</b>	<b>VIF</b>
<b>Independiente</b>	1.049368			
<b>Velocidad</b>	8.27E-06	2.22E-05	0.0309	1.3836
<b>Avance</b>	1.30E-02	0.4038507	0.0031	1.8062
<b>Profundidad</b>	6.58E-02	2.65E-02	0.3862	4.8558
<b>Velocidad<sup>2</sup></b>	-3.41E-08	4.80E-09	-0.6507	1.6801
<b>(Veloc)(Avance)</b>	-2.55E-04	2.06E-04	-0.1975	5.1133
<b>(Veloc)(Profun)</b>	-1.34E-05	1.26E-05	-0.2075	7.6214
<b>Avance<sup>2</sup></b>	2.748189	1.804396	0.168	2.4423
<b>(Avance)(Prof)</b>	-1.25E-02	0.2560829	-0.0101	8.5183
<b>Profundidad<sup>2</sup></b>	-1.44E-02	1.79E-02	-0.1705	9.0729

Un tercer modelo analizado es un modelo cuadrático que obtiene la relación entre la rugosidad y el maquinado utilizando un software denominado NCSS <sup>®</sup>, que ayuda a determinar una constante  $k$  denominada “parámetro de sesgo”, el paquete computacional determina varios parámetros de sesgo y el criterio de selección es que el valor de  $k$  que ayuda a que el VIF tenga los valores más cercano a 1 y que no exceda de 10. Entre mayor sea el valor de  $k$ , mayor será el sesgo, pero la varianza disminuye. Por eso es importante encontrar un valor adecuado.

El resultado de los coeficientes de la denominada regresión ridge para la rugosidad usando un valor de  $k=0.02$  se muestran en la Tabla 7.8, este valor de  $k$  permite ajustar los VIF entre los valores de 1 y 10, también mostrados en dicha Tabla 7.8

El análisis de los resultados de la predicción se realiza de dos formas: primero revisando el error total, que es la suma de las diferencias entre el valor real y la predicción de cada uno de los parámetros dados elevados al cuadrado, este valor se almacena en una variable denominada “error4z genera un resultado de 0.13289604. La segunda forma es mediante

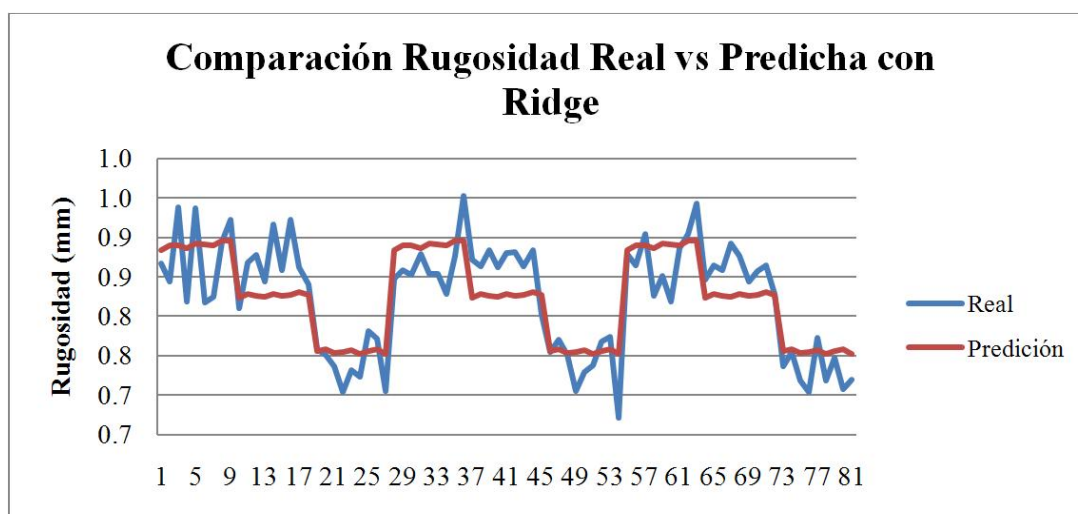


Figura 7.9: Rugosidad real vs predicción con Ridge

la gráfica comparativa mostrada en la Figura 7.9, donde se observa el ajuste logrado.

Los valores generados en el experimento junto con los parámetros de entrada se introdujeron en la red neuronal de retropropagación programada en MatLab ®. Este programa permite predecir el comportamiento de los valores considerando los 5 parámetros de entrada y el ruido. Los resultados obtenidos del entrenamiento generan valores de salida predichos por la red, para cada grupo de parámetros de entrada, si se comparan las predicciones de la red con el valor real obtenido en el experimento físico se obtiene el valor de error, el cual fue almacenado considerando la suma de las diferencias al cuadrado en la variable error4 dentro de la programación realizada en MatLab ®. Para el entrenamiento se hizo un experimento con los últimos 3 parámetros mostrados en la Tabla 6.4, así como en las neurona de la capa oculta y se evalúa el error obtenido dentro de la variable error4. Los mejores valores generados para la predicción de rugosidad con la red en sus entrenamientos se muestran en la Tabla 7.10. Se compara la suma del error con la predicción de la regresión ridge, la red neuronal proporciona mejores predicciones, por lo cual se usará como la función objetivo a optimizar

Figura 7.10: Mejores valores obtenidos de entrenamiento de la red para la predicción de la rugosidad

<b>Variable</b>	<b>Tinp</b>	<b>Tmid</b>	<b>Tout</b>	<b>eta</b>	<b>alpha</b>	<b>Nepochs</b>	<b>error4</b>
<b>Rugosidad</b>	5+1	34	1	1	0.52	15000	3.6708e-4

Para el entrenamiento se utilizaron el 80 % de los datos cargados en la red como parámetros de entrada. Se programó un ciclo que permitió hacer la selección aleatoria de ese 80 %. En la Figura 7.11 se muestra gráfica con los resultados obtenidos en la predicción comparando los valores reales contra los predichos, es decir, el entrenamiento de la red. El 20 % restante se utilizó para validación de los resultados y se muestran los resultados obtenidos en la Figura 7.12 .

De ahí se grabaron los pesos de la capa media (variable m) y los pesos de la capa de salida (variable o) para la rugosidad y se almacenaron en archivos de texto con los nombre de "mRough5p.txtz "oRough5p.txt". Se hizo lo mismo en el rango de trabajo de cada uno de los parámetros analizados incluidos en la variable ascii MRange y se convirtieron en "MrangeR5p.txt", estos datos se utilizarán al momento de la optimización.

Para el caso de los demás parámetros se siguió el mismo procedimiento descrito con anterioridad. Para la temperatura primero se tomaron todos los datos y se pusieron sus resultados de acuerdo a los parámetros de entrada para cada una de sus réplicas y estos parámetros se muestran en las Figura 7.15, Figura 7.16 y Figura 7.17. También están los parámetros de entrenamiento de la red neuronal, para el que se hizo un diseño de experimentos y se evaluó la variable error4, considerando en el análisis las neuronas de la capa media, la eta, el alpha y el Nepochs (ciclos), presentando los resultados con mejor desempeño en la Tabla 7.18.



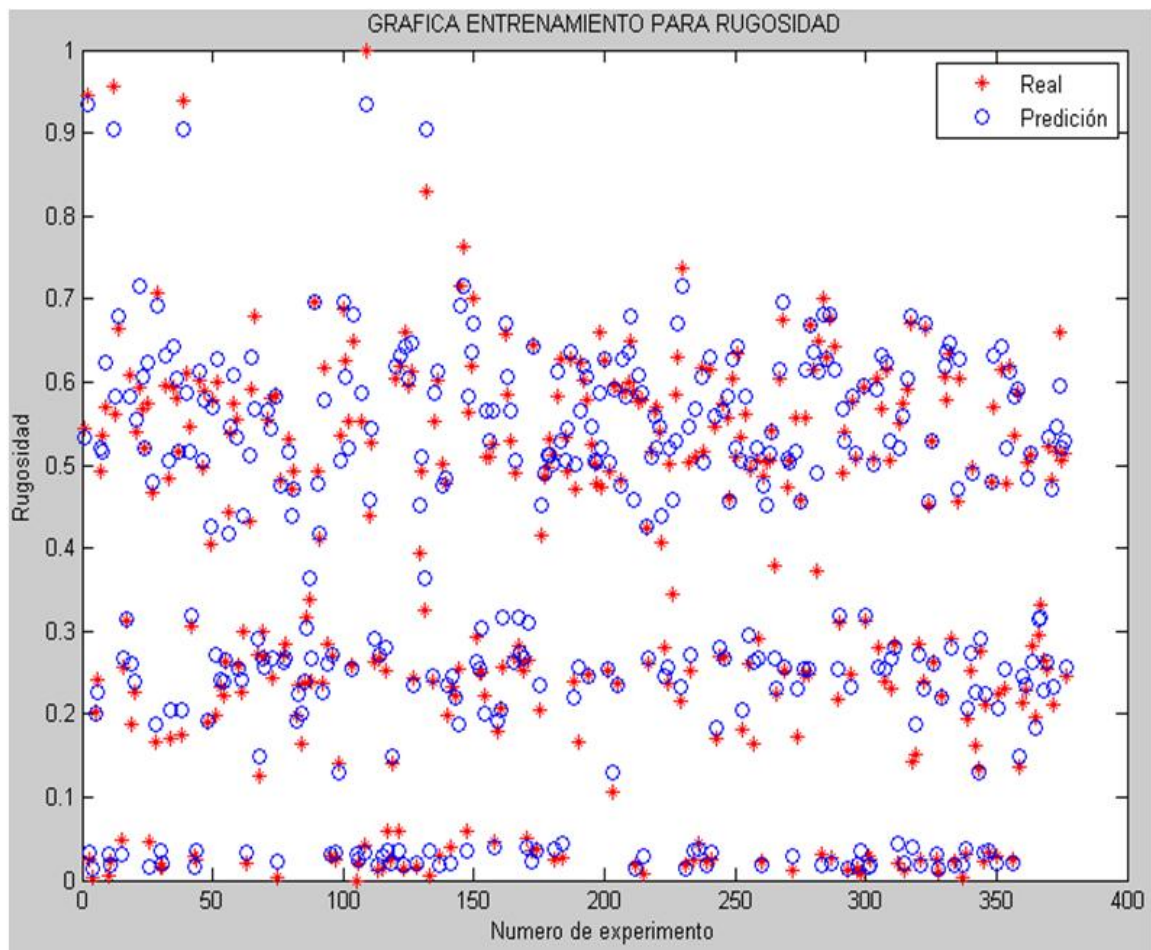


Figura 7.11: Resultados de la comparación del valor real vs predicho

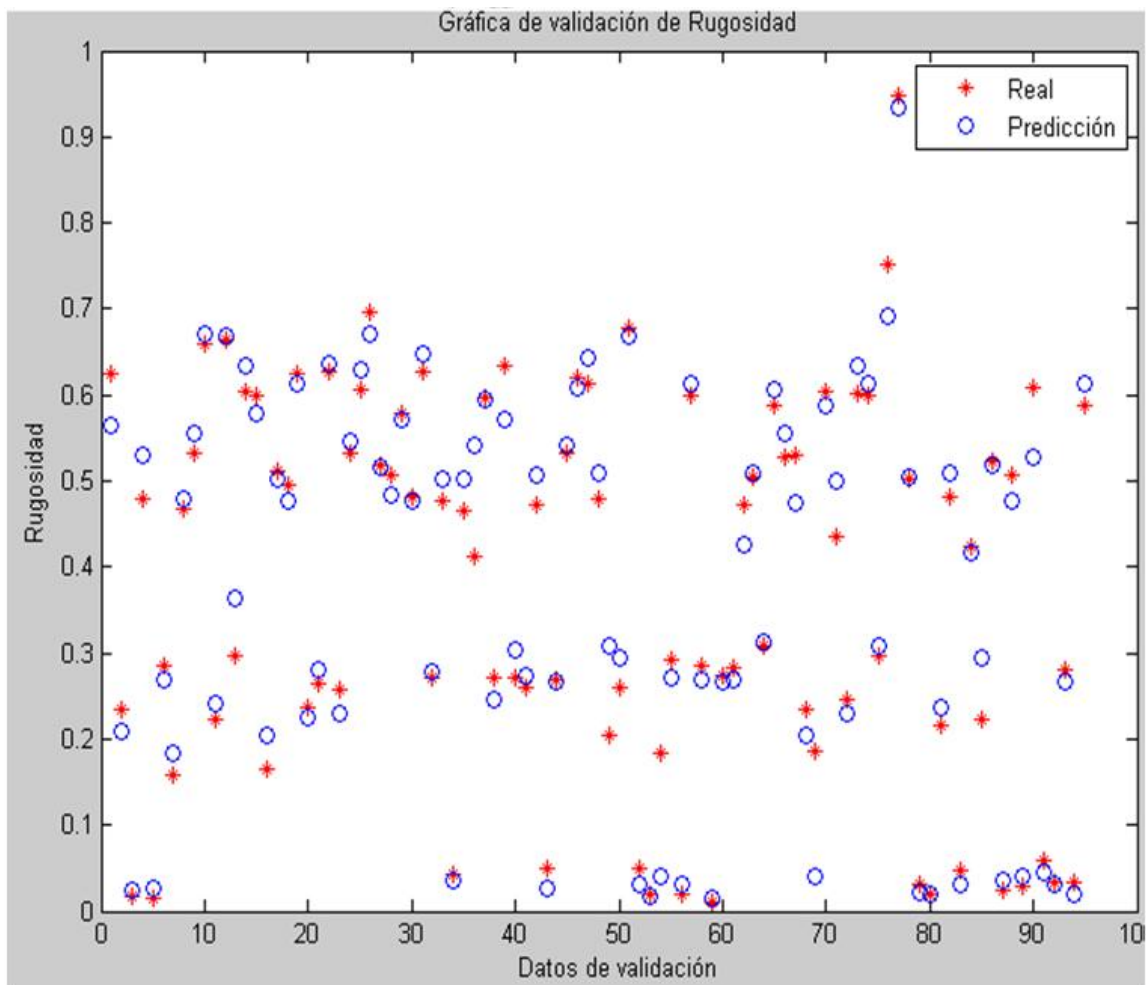


Figura 7.12: Resultados de validación para la rugosidad

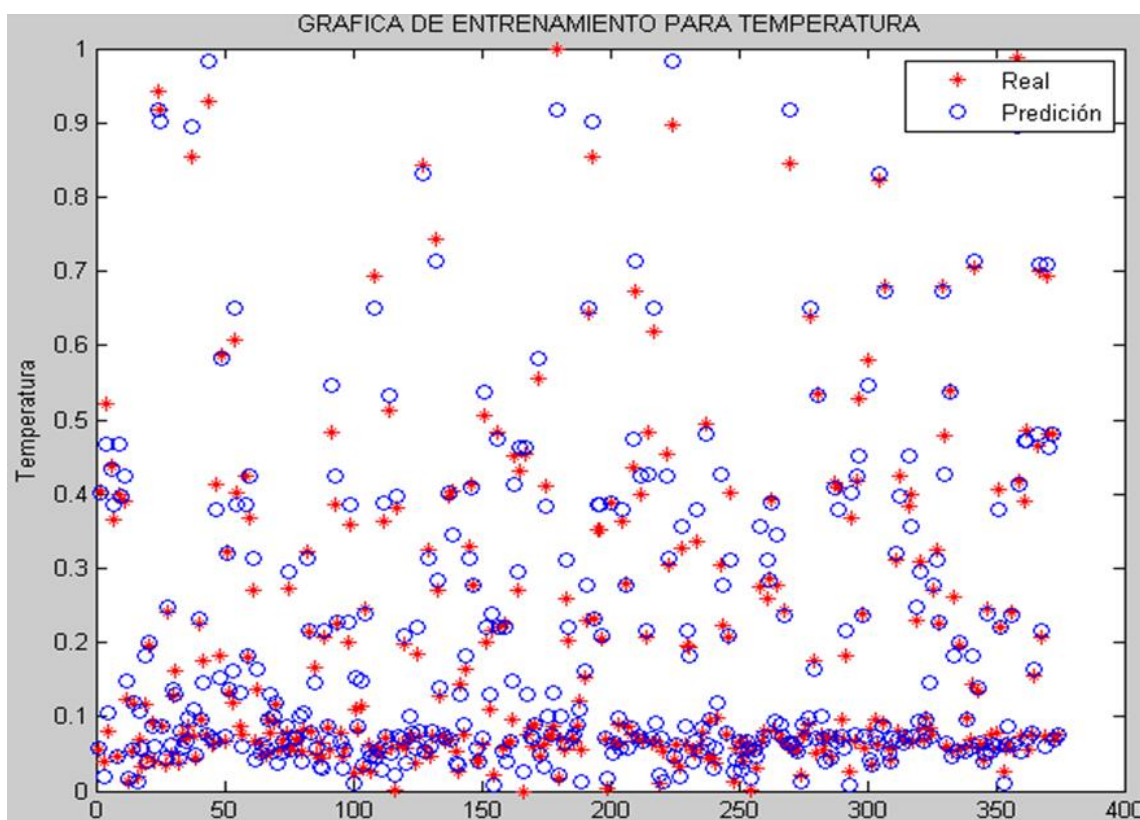


Figura 7.13: Resultados de la comparación del valor real vs predicho

Se introdujeron los datos de temperatura en la red neuronal y se hizo la predicción, se utilizó el 80 % de estos datos para el entrenamiento, presentado en la Figura 7.13 y el 20 % de los mismos para validación presentado en la Figura 7.14.

Para el caso de la temperatura los pesos de la capa media fueron almacenados en la variable "mTemp5p.txt" y "oTemp5p.txt", para el caso de los intervalos utilizados, se almacenaron en la variable "MRangeT5p.txt". Estos parámetros fueron utilizados para hacer uso de los mismos al momento de los análisis a través de cúmulos de partículas.

Para el tiempo se tomaron las mediciones en el proceso debido a que el tiempo es

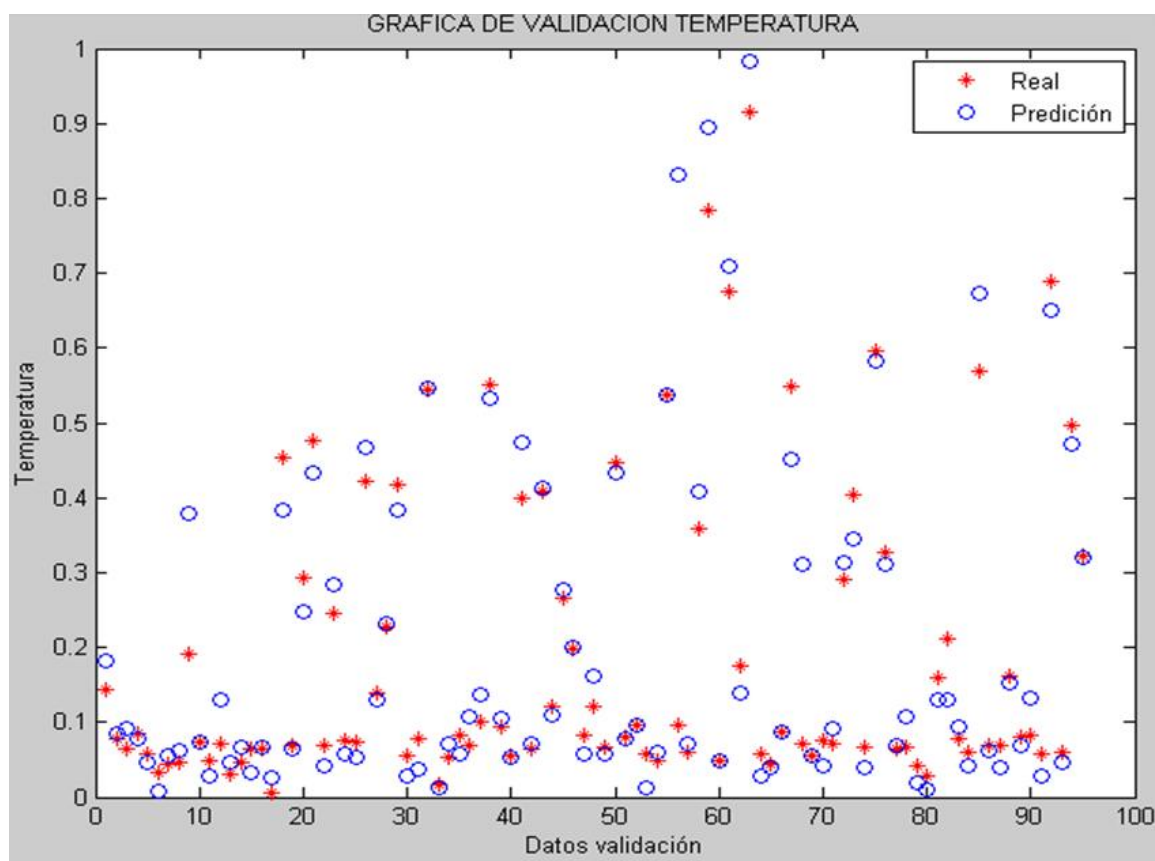


Figura 7.14: Resultados de validación para la temperatura

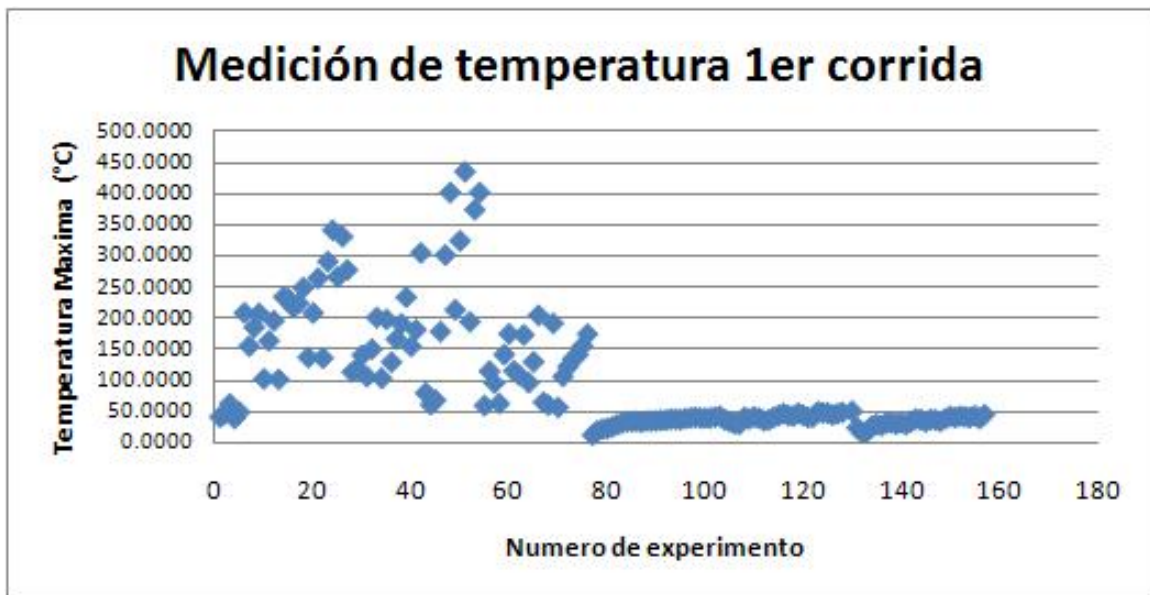


Figura 7.15: Gráficas de temperatura en primer corrida de temperatura

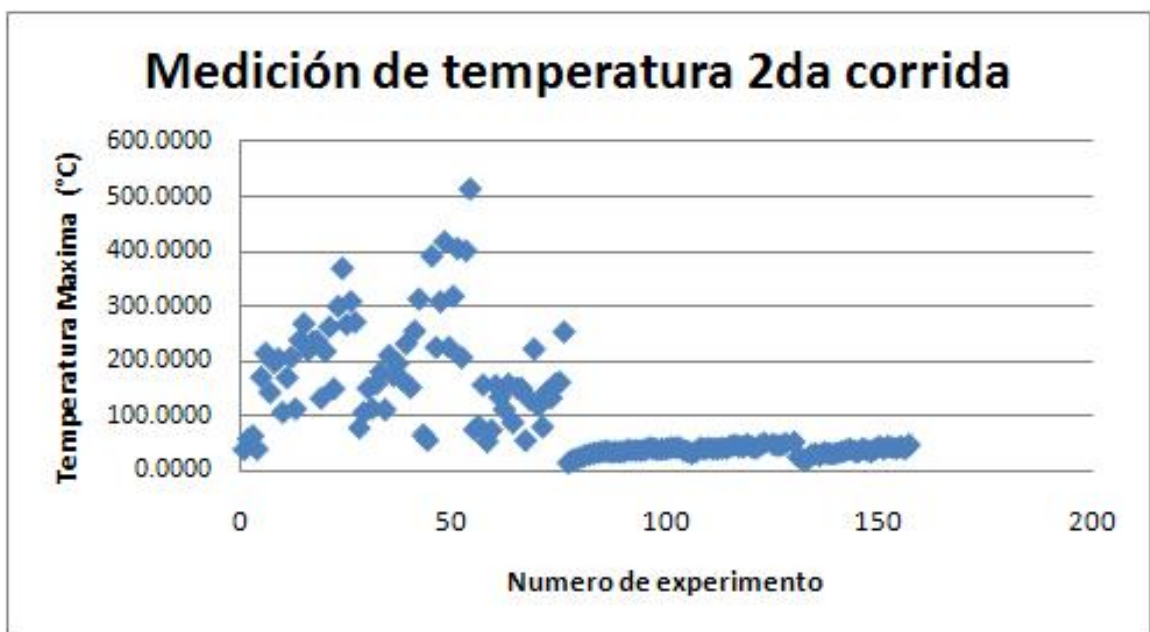


Figura 7.16: Gráficas de temperatura en la segunda corrida de temperatura

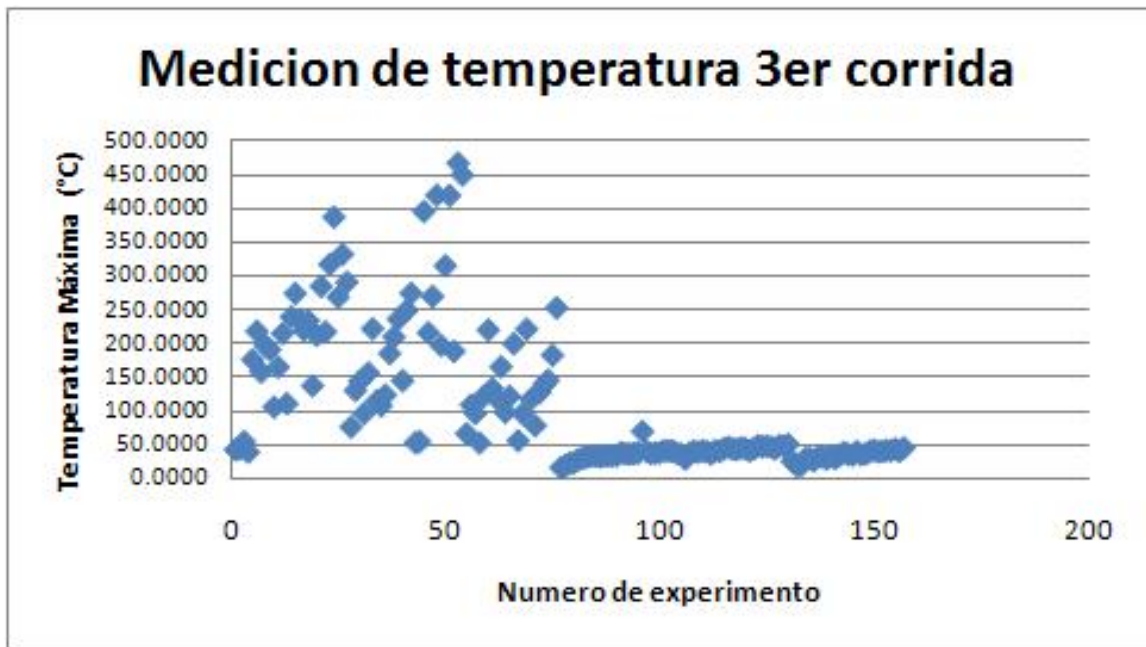


Figura 7.17: Gráficas de temperatura en la tercer corrida de temperatura

Figura 7.18: Valores obtenidos de entrenamiento de la red para la predicción de la temperatura

Variable	Tinp	Tmid	Tout	eta	alpha	Ntepochs	error4
Temperatura	5+1	36	1	0.8	0.65	11000	3.7492e-005



Figura 7.19: Gráfica de tiempo

Variable	Tinp	Tmid	Tout	eta	alpha	Ntepochs	error4
<b>Tiempo</b>	5+1	36	1	0.79	0.65	11000	0.0094

Figura 7.20: Mejores valores obtenidos de entrenamiento de la red para la predicción del tiempo constante independientemente del uso de refrigerante o no, con el tamaño de la herramientas, sólo se modifica al variar la velocidad, el avance y la profundidad, por ello se tomaron tiempos para esas modificaciones; estos tiempos son mostrados en la Figura 7.19.

En la variable del tiempo también se hicieron predicciones con la red neuronal de retropropagación, usando como valores de entrenamiento los mostrados en la Tabla 7.20. Después de hacer un análisis exhaustivo de los parámetros se concluyó que éstos fueron los mejores valores obtenidos para la predicción.

Dentro de la red programada en MatLab <sup>®</sup> y considerando como parámetros de entrada el lubricante, la velocidad, el avance, la herramienta y la profundidad y como salida



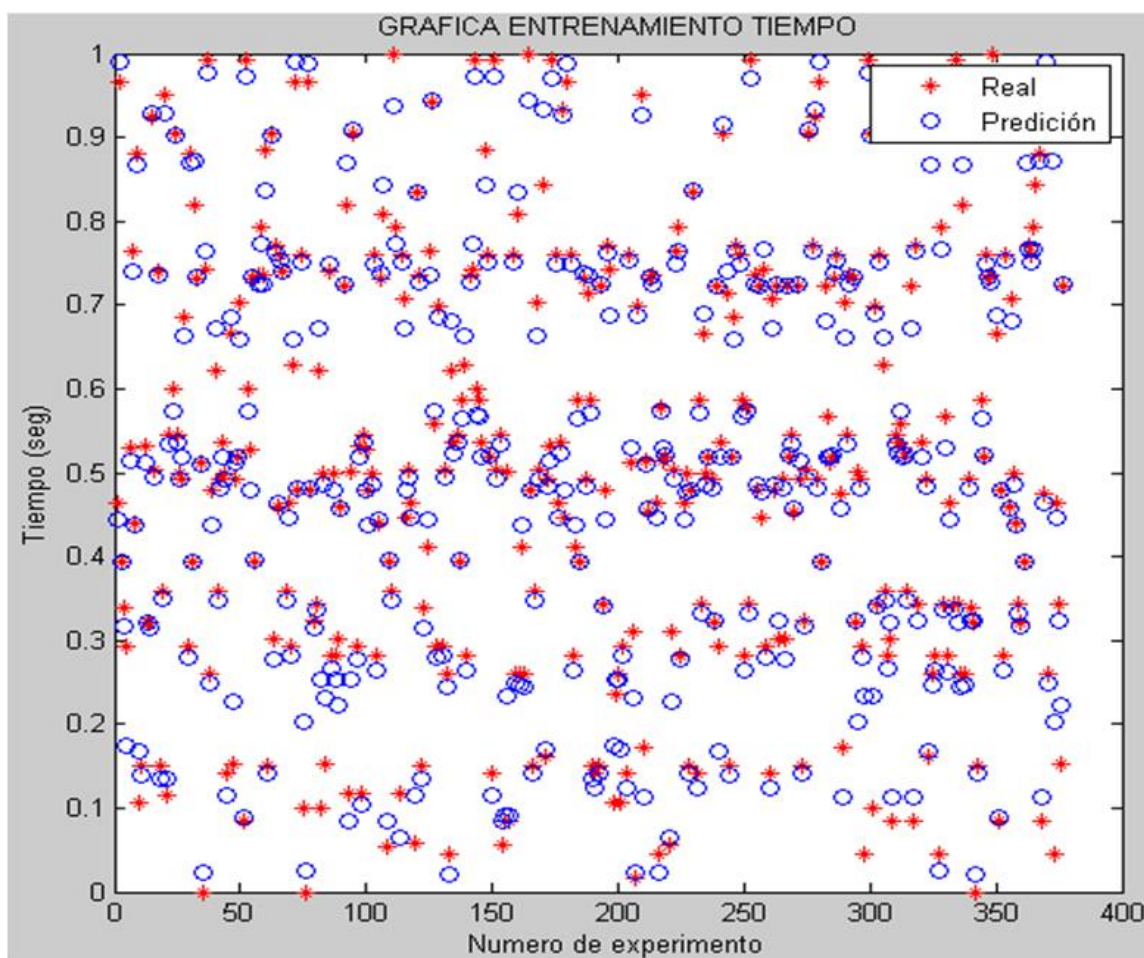


Figura 7.21: Resultados de la comparación del valor real vs predicho

en tiempo, se tomaron el 80 % de los datos para entrenamiento mostrando dicho entrenamiento en la gráfica de la Figura 7.21 y el 20 % de los datos para validación mostrado en la Figura 7.22, para escoger los datos se le agregaron al programa movimientos que permiten hacer una selección de datos aleatoria.

Los pesos de la capa media y de la capa de salida de la variable tiempo fueron almacenados en la variable "mTime5p.txt" "oTime5p.txt", para el caso de los intervalos utilizados, se almacenaron en la variable "MRangeTime5p.txt", datos que serán necesar-



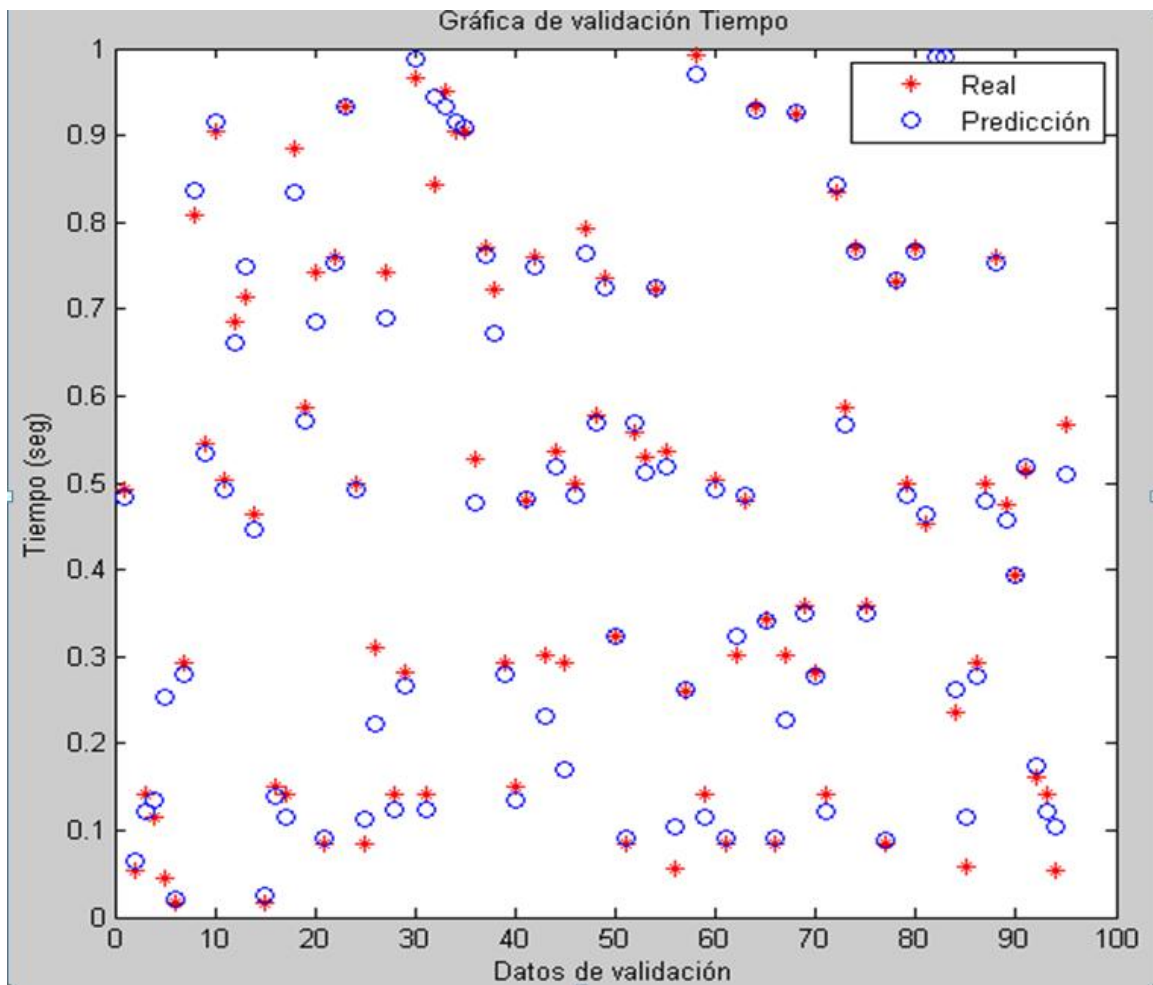


Figura 7.22: Resultados de validación para el tiempo

Figura 7.23: Mejores valores obtenidos de entrenamiento de la red para la predicción del desplazamiento

<b>Variable</b>	<b>Tinp</b>	<b>Tmid</b>	<b>Tout</b>	<b>eta</b>	<b>alpha</b>	<b>Nepochs</b>	<b>error4Mean</b>
<b>Desplazamiento</b>	5+1	100	1	0.6	0.65	10000	3.3237e-004

ios en la optimización a través de cúmulos de partículas.

La última variable a analizar es el desplazamiento al momento de hacer la medición. Dicho desplazamiento analizado a través del multianalizador PULSE 3560B, utilizado para entrenar una red neuronal de retropropagación, la cual tiene 6 variables, y a la que se le hizo un diseño de experimentos y con ello analizar cuáles serían los mejores valores para dichas variables, estos datos están mostrados en la Tabla 7.23, incluyendo el error, que es la variable que ayuda a tomar la decisión de cuáles son los mejores parámetros.

En la variable desplazamiento se utilizó el 80 % de los datos obtenidos en las pruebas para el entrenamiento de la red neuronal, dicho entrenamiento es mostrado en la figura 7.24 y el 20 % de los mismos para la validación, los datos fueron seleccionados de manera aleatoria, (ver Figura 7.25). Una vez obtenidos los mejores parámetros de error, se guardaron los pesos de la capa media y de la capa de salida, a través de las variables "oDesp5p.txtz "mDesp5p.txt", así como el intervalo de trabajo en la variable "MRangeDesp5p.txt".

El propósito de esta tesis al integrar el cúmulo de partículas con la red neuronal es buscar un grupo de parámetros óptimos que puedan ser utilizados en el proceso de maquinado real. El cúmulo de partículas inicia con un grupo de partículas generado de manera aleatoria. La Red Neuronal de Retropropagación predice cada uno de los parámetros utilizados para cada una de las partículas que se usan como funciones objetivo y que serán optimizadas por el cúmulo de partículas. Este algoritmo fue inspirado en base al

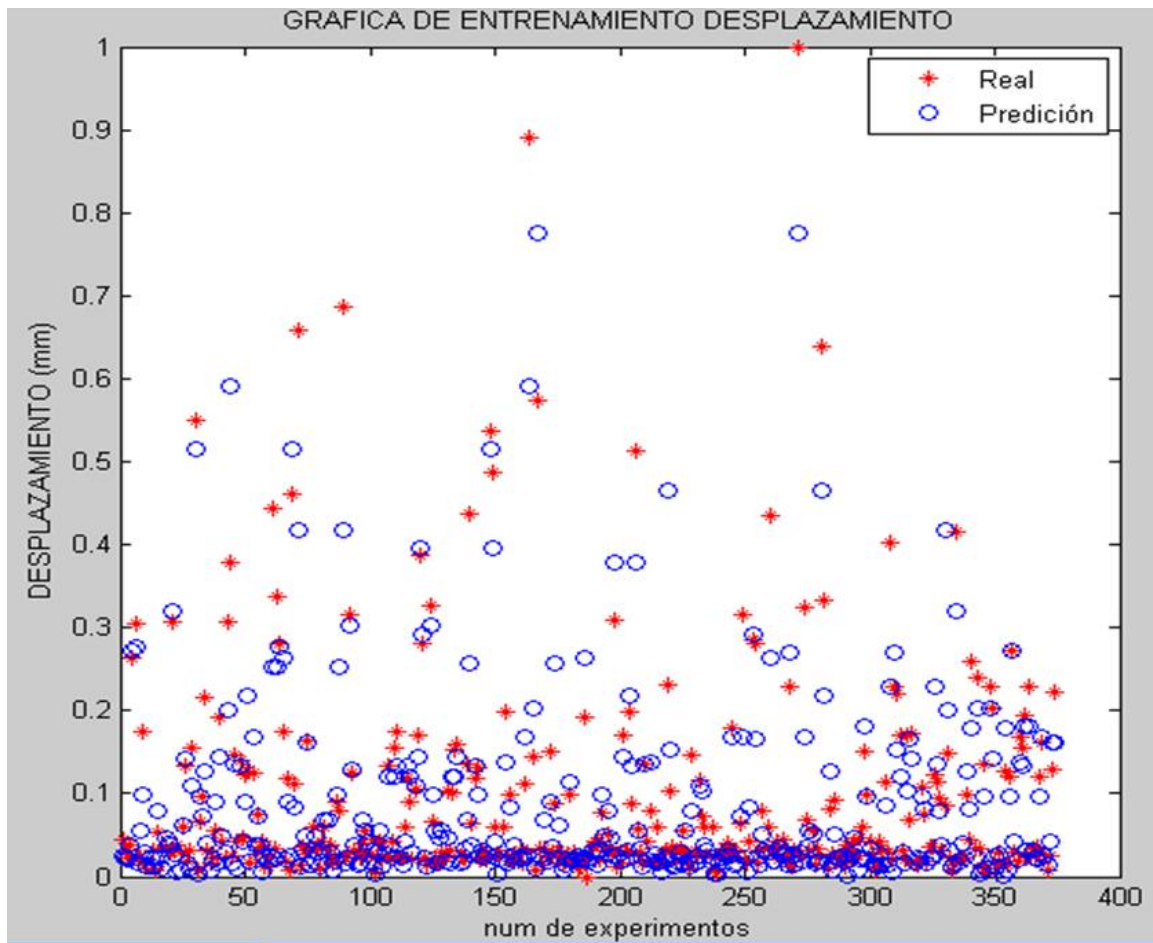


Figura 7.24: Resultados de la comparación del valor real vs predicho

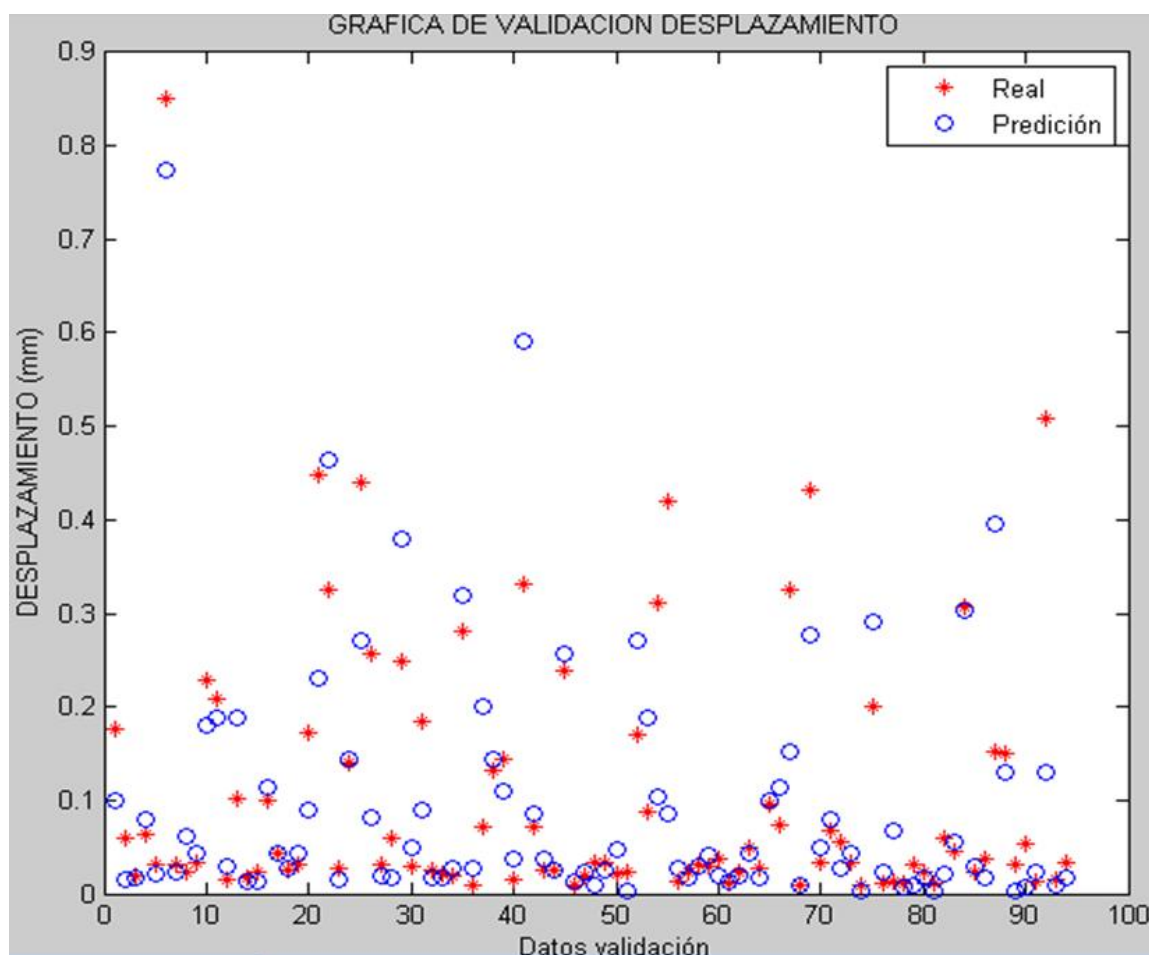


Figura 7.25: Resultados de validación para el desplazamiento

Tabla 7.2: Parámetros del cúmulo de partículas.

Variable	Descripción
NTI	Número total de individuos
Ciclos	Ciclos para convergencia
alpha	Dirección de la velocidad
beta1	Seguimiento al líder local
beta2	Seguimiento al líder global

comportamiento de las aves, basado en sus movimientos, donde cada una de las partículas se desplaza de acuerdo a reglas donde ajustan la velocidad considerando los desplazamientos que hagan los individuos cercanos o vecinos y también considerando la influencia entre partículas que representan ciertas tendencias. Es decir este algoritmo busca un óptimo en función al movimiento de las partículas considerando como espacio de búsqueda en base a un grupo de parámetros a evaluar, usando la información que ha dejado la exploración realizada en el pasado, así como la información de las partículas cercanas. Al principio las partículas se encuentran en todo el espacio de búsqueda, pero al paso de la búsqueda se llega a una convergencia y se reduce el espacio de solución y con ello se vuelve mas rápida la búsqueda, cada partícula tiene una posición y una velocidad, además de guardar el vector de mejor posición hasta el momento para ayudar a la trayectoria. Para realizar dicho algoritmo se consideraron ciertos parámetros del cúmulo de partículas que se encuentran en la Tabla 7.31

El aplicar algoritmos avanzados puede ayudar a la industria manufacturera a tomar decisiones al encontrarse en disyuntivas basadas en múltiples objetivos; por ejemplo, el conocer el comportamiento de la rugosidad a través de diversos parámetros de estudio puede ayudar a hacer el proceso de fresado más competitivo sin la necesidad de utilizar el rectificado, pero la rugosidad puede depender de la herramienta, o de las condiciones de corte y otros parámetros. Por otro lado el modificar las condiciones de corte pueden hacer que el tiempo de maquinado se eleve, lo cual provocaría también una disminución

en la velocidad de remoción de material. Para tener una alternativa correcta de selección se necesita obtener un grupo de condiciones óptimas, las cuales proporcionen una mayor cantidad de propuestas a diferentes circunstancias, para analizar dichas alternativas se elaboró un programa en MatLab ® el cual ayudó a evaluar las siguientes premisas:

$$f1=\text{minimizar}(\text{rugosidad})$$

$$f2=\text{minimizar}(\text{tiempo})$$

$$f3=\text{maximizar}(\text{velocidad de remoción de material}=v * f * d)$$

Primero se hizo un análisis de las partículas no dominadas, pero fue necesario añadir un límite para evitar la salida de los parámetros que se evalúan. De ahí se seleccionaron las mejores dominadas, las cuales generan un frente de Pareto que es la información necesaria para el proceso de fresado. La Figura 7.26 muestra las partículas iniciales del estudio y la solución del frente de Pareto de la rugosidad y el tiempo. En la Figura 7.27 se ve el frente de Pareto de la Velocidad de Remoción de Material (MRR) contra la rugosidad, así como las partículas iniciales del proceso antes de hacer la optimización. La Figura 7.28 muestra la relación entre MRR y el tiempo y se puede analizar que las partículas se desplazan hacia la derecha ya que se requiere que la MRR aumente y el tiempo disminuya lo más posible. En la Figura 7.29 se muestra el frente de Pareto observando los 3 parámetros: minimizar la rugosidad y a la vez minimizar el tiempo, mientras se maximiza la velocidad de remoción de material.

Los resultados obtenidos utilizaron los valores dados en la Tabla 7.30 para los parámetros del cúmulo de partículas y generó un frente de Pareto de rugosidad, tiempo y MRR con 75 soluciones no dominadas. Si se quiere analizar sólo un parámetro sería sencillo, ya que minimizar el avance hace que se minimice la rugosidad, pero el tiempo se incrementa y la MRR se minimiza lo cual vuelve este análisis con objetivos encontrados, por lo que al

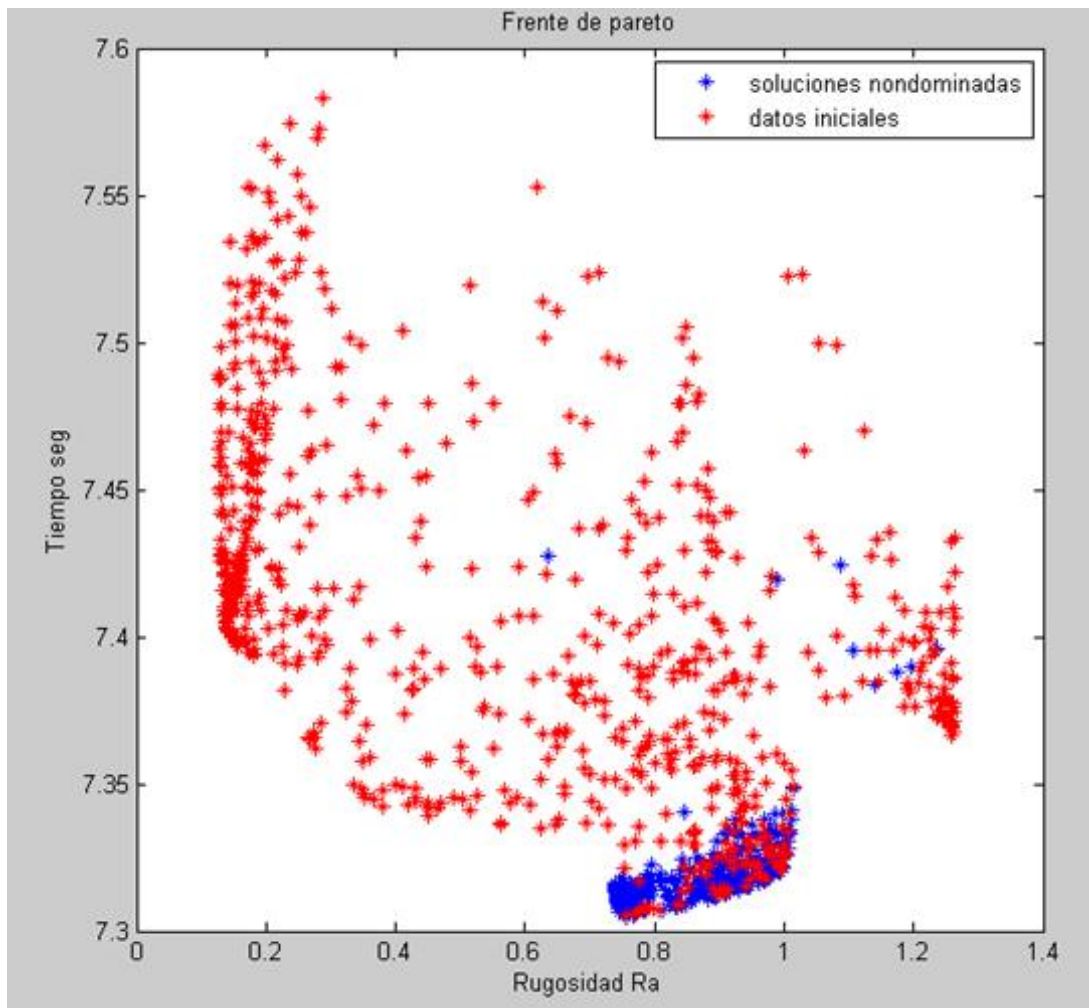


Figura 7.26: Frente de Pareto de rugosidad vs tiempo

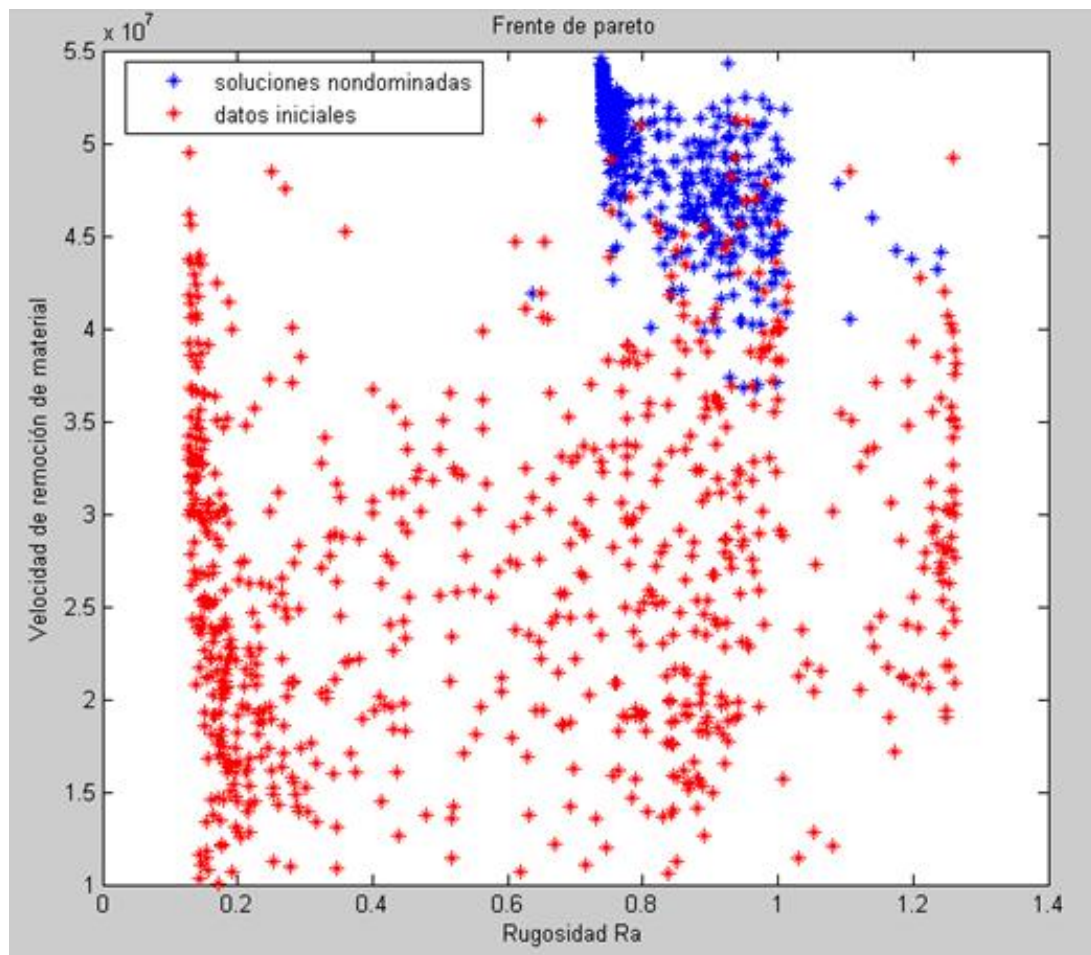


Figura 7.27: Frente de Pareto de rugosidad vs MRR



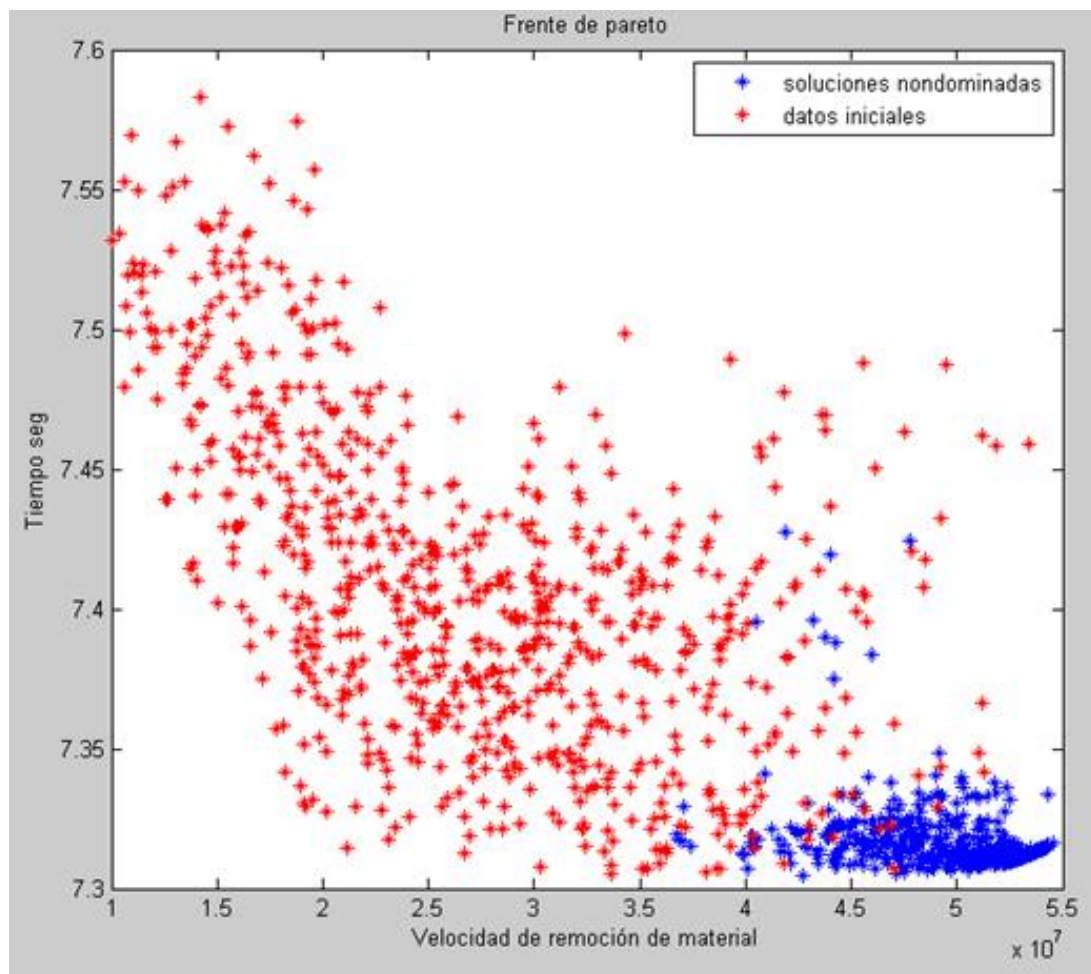


Figura 7.28: Frente de Pareto de MRR vs Tiempo

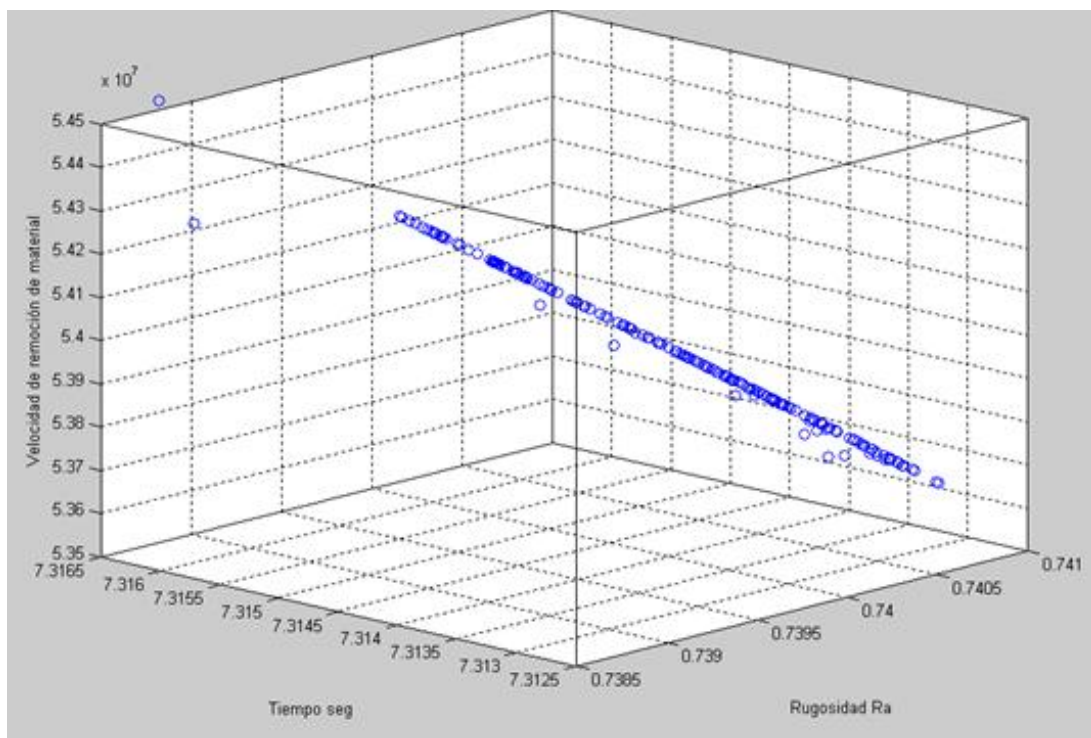


Figura 7.29: Frente de pareto de Rugosidad vs Tiempo vs MRR

Figura 7.30: Valores usados para los parámetros del cúmulo de partículas

<b>Ciclos</b>	<b>NTI</b>	<b>Alpha</b>	<b>Beta1</b>	<b>Beta2</b>
<b>1000</b>	750	0.5	0.5	0.25

Figura 7.31: Conjunto de pareto

lubricante	hta	RPM	Feed	Profundidad	Rugosidad	Tiempo	VRM
1	1.8070223	82353.811	415.70419	1.2899187	0.61145252	7.7226414	44160140
1	1.7621032	83202.136	426.25702	1.0922317	0.58373496	7.4772228	38736537
1	1.6866402	83668.164	412.519	1.1914532	0.61462585	7.6035672	41122659
1	1.8222975	83734.206	375.81598	1.1619635	0.48770491	8.2814669	36565426
0	1.7676299	84065.505	429.24212	1.1530031	0.86778813	7.3926152	41605489
1	1.7365923	84088.329	427.37854	1.2292031	0.67020766	7.480155	44174545
1	1.7870829	84243.458	372.07262	1.2467162	0.49351124	8.4175914	39077925
1	1.6976792	84424.353	421.02977	1.2969041	0.71686418	7.540429	46098671
1	1.770168	84461.462	423.39371	1.2734377	0.62351747	7.526774	45538707
1	1.829811	84901.127	397.93692	0.92240708	0.48615563	7.6590479	31163793
1	1.7829407	85043.254	427.44313	1.2520389	0.60956503	7.4641794	45513060
1	1.6878812	85227.994	424.16209	1.18949	0.66379709	7.4405252	43000639
1	1.7578822	85356.414	373.18908	1.2344409	0.49793227	8.4030617	39321981
1	1.8113383	85388.005	403.98058	1.0822333	0.49522509	7.6183275	37331741
1	1.7786715	85437.913	427.37555	1.2316828	0.58842119	7.4431209	44973758
1	1.7186645	85555.686	421.11596	1.3307645	0.65805227	7.5141599	47945934
1	1.7557346	85718.181	370.87265	1.0987257	0.49480604	8.3940698	34929071
1	1.6765433	86297.332	423.89212	1.2333654	0.69742589	7.4211603	45117442
1	1.7409259	86310.721	403.58773	1.0313826	0.52006626	7.5795947	35927128
1	1.7075415	86317.371	425.15472	1.3265967	0.67842166	7.4471515	48683761
1	1.7471358	86423.993	426.18306	1.2440945	0.5866297	7.4187377	45823038
1	1.7952104	86477.922	362.99667	1.2389555	0.49709495	8.8374812	38892297

tener el frente de pareto tendrían varias posibles soluciones que implican sacrificar algo de rugosidad para reducir el tiempo o viceversa, en la Tabla 7.31 se muestra algunos valores del conjunto de pareto.

# Capítulo 8

## Conclusiones y Trabajos Futuros

En esta tesis se presenta una metodología para formular y resolver problemas de optimización con multiobjetivo que existen al momento de fresar el Ti 6Al-4V considerando la rugosidad, la velocidad de remoción de material y el tiempo, con parámetros de entrada como lubricante, tipos de herramientas, velocidad, avance y profundidad usando las redes neuronales como funciones objetivo en conjunto con la técnica de cúmulo de partículas. El tiempo de corte está directamente al avance, lo cual hará que el rozamiento de la herramienta de trabajo y la pieza incremente la temperatura de corte. La temperatura de corte es mayor al no usar refrigerante, y con el uso del mismo no se genera un incremento de temperatura aún y cuando los parámetros de corte varien. Se obtuvo un conjunto de pareto para la solución de los problemas multiobjetivos que permiten minimizar la rugosidad y el tiempo y maximizar la velocidad de remoción de material al mismo tiempo. Al integrar los modelos desarrollados con la red neuronal con la optimización de cúmulo de partículas

# Bibliografía

- [Ang98] *Evolutionary optimization versus particle swarm optimization: Philosophy and performance differences.*, 7th International Conference (1998), no. 98, 601–610.
- [Arr08] *Machinability of titanium alloys (ti6al4v and ti555.3)*, Journal of Materials Processing Technology (2008).
- [Bau04] *Pareto optimality and particle swarm optimization*, Inst. for Fundamentals and Theor. in Electr. Eng (2004), no. 2, 1172–1175.
- [Cha10] *Application of soft computing techniques in machining performance prediction and optimization: a literature review*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology (2010), no. 5-8, 445–464.
- [Cho04] *Autonomous agent response learning by a multi species particle swarm optimization.*, Congress on Evolutionary Computation (CEC 2004) (2004), 778–785.
- [Coe99] *A comprehensive survey of evolutionary-based multiobjective optimization techniques.*, Knowledge and Information Systems. An International Journal (1999), no. 3, 269–308.
- [Coe02] *Evolutionary algorithms for solving multi objective problems.*, Kluwer Academic Publishers, (2002).
- [Coe04] *Handling multiple objectives with particle swarm optimization*, IEEE Transactions on Evolutionary Computation (2004), no. 3, 256–279.

- [Eng02] *Computational intelligence: An introduction*, John Wiley Sons (2002).
- [Eng05] *Fundamentals of computational swarm intelligence*, John Wiley Sons (2005).
- [Esc08] *A comparison between back propagation and the maximum sensibility neural network to surface roughness prediction in machining of titanium*, Lecture Notes in Computer Science (2008), no. 1, 1009–1019.
- [Esc09] *Optimization using neural network modeling and swarm intelligence in the machining of titanium (ti 6al 4v) alloy*, Eight Mexican Internatinal Conference on Artificial Intelligence (2009), 33–38.
- [Esc11] *Particle swarm optimization in the machining of titanium alloy*, XX International Materials Research Congress (2011), 1.
- [Fan08] *A comparative study of the cutting forces in high speed machining of ti 6al 4v and inconel 718 with a round cutting edge*, Journal of Material Processing Technology (2008).
- [Fie02] *A multiobjective algorithm based upon particle swarm optimisation, an efficient data structure and turbulence*, Proceedings of the 2002 U.K. Workshop on Computational Intelligence (2002), 37–44.
- [Gho04] *Meta knowledge of intelligent manufacturing, an overview of state of the art*, Industrial Engineering (2004).
- [Gol87] *Genetic algorithms with sharing for multimodal function optimization*, Proceedings of the Second International Conference on Genetic Algorithms (1987), no. 41-49.
- [Gun98] *On a multi-objective evolutionary algorithm and its convergence to the pareto set*, Proceedings of the 5th IEEE Conference on Evolutionary Computation (1998), 511–516.

- [Hei07] *Machine tool design requirements for high-speed machining*, CIRP Annals Manufacturing Technology (2007), no. 1, 389–392.
- [Hon03] *Machinability of steels and titanium alloys under lubrication*, Proceedings of the 9th International Conference (2003), no. 1, 34–39.
- [Hu202] *Multiobjective optimization using dynamic neighborhood particle swarm optimization.*, Congress on Evolutionary Computation (CEC 2002) (2002), 1677–1681.
- [Hu203] *Particle swarm with extended memory for multiobjective optimization*, Proceedings of the 2003 IEEE Swarm Intelligence Symposium (2003), 193–197.
- [Jan03] *A hierarchical particle swarm optimizer*, Congress on Evolutionary Computation IEEE Press (2003), 770–776.
- [Jin01] *. dynamic weighted aggregation for evolutionary multiobjective optimization: Why does it work and how?*, Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference (GECCO 2001) (2001), 1042–1049.
- [Kal89] *An investigation of niche and species formation in genetic function optimization*, Proceedings of the Third International Conference on Genetic Algorithms (1989), 42–50.
- [Kal02] *A fast and elitist multiobjective genetic algorithm*, IEEE Transactions on Evolutionary Computation (2002), 182–192.
- [Ken95] *Particle swarm optimization*, In Proceedings of the 1995 IEEE International Conference on Neural Networks (1995), 1942–1948.
- [Ken01] *Swarm intelligence*, Morgan Kaufmann Publishers (2001).

- [Kra07] *Optimisation of tool life and productivity when end milling inconel 718tm*, Journal of Materials Processing Technology (2007), no. 1-3, 153–161.
- [Kuh51] *Nonlinear programming*, Proceedings of the Second Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability (1951), 481–492.
- [Lau02] *Combining convergence and diversity in evolutionary multiobjective optimization*, Evolutionary Computation (2002), no. 263-282.
- [Laz05] *Preducción de la rugosidad superficial del acero rolled 1018 a través de la metodología de superficies de respuesta y redes neuronales*, CULCYT (2005).
- [Mie99] *Nonlinear multiobjective optimization*, Kluwer Academic Publishers, 1999.
- [Mol02] *Modeling of tool wear by diffusion in metal cutting*, Wear (2002), no. 1-2, 135–149.
- [Moo99] *Application of particle swarm to multiobjective optimization.*, Department of Computer Science and Software Engineering (1999).
- [Nag] *Cim still the solution for manufacturing industry*, International Journal Computer Integrated Manufacturing, no. 31.
- [Nal07] *The effect of cutting speed and cutting tool geometry on machinability properties of nickel base inconel 718 super alloys*, Materials and Design (2007), no. 4, 1334–1338.
- [Nat07] *Application of particle swarm optimisation in artificial neural network for the prediction of tool life*, International journal of advanced manufacturing technology (2007), no. 9-10, 871–876.
- [Nur07] *Effectiveness of uncoated wcco and pcd inserts in end milling of titanium alloy ti 6al 4v*, Journal of Materials Processing Technology (2007), 147–158.



- [Ozc05] *Determination of effecting dimensional parameters on warpage of thin shell plastic parts using integrated response surface method and genetic algorithm*, International Communications in Heat and Mass Transfer (2005), no. 8, 1085–1094.
- [Oze07] *Multi-objective optimization for turning processes using neural network modeling and dynamic neighborhood particle swarm optimization*, International Journal Advanced Manufacturing Technology (2007), 234–247.
- [Par04] *Upso: A unified particle swarm optimization scheme*, Proc. of the Int. Conf. of Computational Methods in Sci. and Eng (2004), 868–873.
- [Per06] *The influence of sulfur on the machinability of gray cast iron fc25*, Journal of Material Processing Technology (2006), no. 1, 165–171.
- [Pra08] *Modeling of metal forming and machining processes*, Springer, 2008.
- [Ram07] *Modeling for prediction of surface roughness in machining of ti64 alloy using response surface methodology*, Materials Processing Technology (2007).
- [Rao06] *Machinability evaluation of work materials using a combined multiple attribute desicion-making method*, International Journal of Advanced Manufacturing Technology (2006), no. 1, 221–227.
- [Ray02] *A swarm metaphor for multiobjective design optimization.*, Engineering Optimization (2002), no. 2, 141–153.
- [Rib03] *Optimization of titanium alloy (6al 4v) machining*, Journal of Materials Processing Technology (2003), 458–463.
- [Rui11] *Aplicación de los algoritmos genéticos al dise'no óptimo multiobjetivo de troqueles de corte y punzonado simples y progresivos*, Revista de Matemática: Teoría y Aplicaciones (2011), no. 2.

- [Sar03] *Machining parameters optimisation for turning cylindrical stock into a continuous finished profile using genetic algorithm (ga) and simulated annealing (sa)*, International Journal of Advanced Manufacturing Technology (2003), no. 1, 1–9.
- [Seb09] *Estudio de los parámetros de acabado superficial en el mecanizado de la aleación de al cu aa2024*, Ingegraf (2009).
- [Shi98] *Parameter selection in particle swarm optimization.*, Seventh annual Conference on Evolutionary Programming, (1998), 591–600.
- [Shi99] *Empirical study of particle swarm optimization.*, Congress on Evolutionary Computation (CEC 1999) (1999), 1945–1950.
- [Su2]
- [Tos04] *Using clustering techniques to improve the performance of a particle swarm optimizer.*, Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference (GECCO 2004), Lecture Notes in Computer Science (2004), 225–237.
- [Tur04] *A managerial perspective*, Pearson Prentice Hall, 2004.
- [Ulu11] *Machining induced surface integrity in titanium and nickel alloys: A review*, International Journal of Machine Tools and Manufacture (2011), no. 3, 250–280.
- [Vel05] *Diseño óptimo evolutivo*, Centro de Diseño y Manufactura UNAM (2005).
- [Zhe03] *On the convergence analysis and parameter selection in particle swarm optimization.*, Proceedings of the Second International Conference on Machine Learning and Cybernetics (2003), 1802–1807.
- [Zit00] *Comparison of multiobjective evolutionary algorithms: Empirical results*, Evolutionary Computation (2000), no. 173-195.

# Anexo A

## Apéndice I

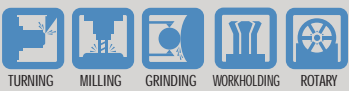
### A.1. BRIDGEPORT VCM 760

Este apartado muestra los datos técnicos de la máquina Bridgeport VCM 760 que fue la utilizada para el maquinado de las probetas.

MILLING



XR-Series  
High-Performance  
Vertical Machining Centers



TURNING MILLING GRINDING WORKHOLDING ROTARY

[www.bpt.com](http://www.bpt.com)

 **BRIDGEPORT**  
EXPECT MORE™

# XR-Series High-Performance Vertical Machining Centers

An investment in Bridgeport's latest generation of XR-Series vertical machining centers is guaranteed to bring instant and positive results. All models feature the latest WEISS spindle technology, providing high radial and axial rigidity for fast and ultra-productive machining. Our unrivalled technology coupled with an unwavering commitment to improving our customers' productivity and business performance have contributed to a large, and loyal, customer base. Always at the cutting-edge of innovative and technological developments, the Bridgeport name is synonymous with quality and engineering excellence that is second to none.



XR 610  
XR 760  
XR 1000



XR 1270  
XR 1500



Final assembly of the XR 1000 in Elmira, NY.



## Unique features that make the XR-Series Vertical Machining Centers the best in the industry!

### Rigid machine base

See page 4



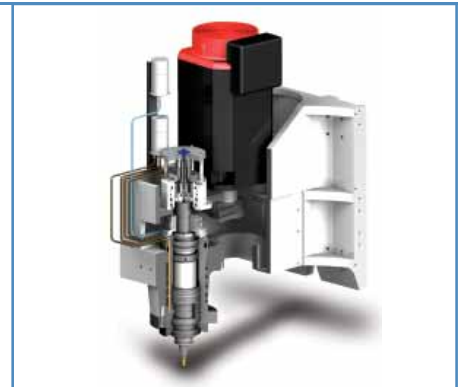
### Heavy-duty linear guideways, ballscrews and axis drives

See page 5



### Unprecedented spindle technology

See page 6-7



### Advanced digital CNC control systems

See page 10-11





# XR-Series High-Performance Vertical Machining Centers

Rigidity...built like a rock from the ground up

**Best overall working cube in its class—610mm (24-inch) Y-axis travel on XR 760 and XR 1000**

Unique ATC mount design for superior rigidity and minimized vibration to the cutting zone.

Large 45mm high-quality, low maintenance linear guideways provide greater positioning accuracy and superior finishes—very low friction and high stiffness for long machine life.

Highly engineered machine structure manufactured from grey cast iron—heavily ribbed throughout to ensure high overall rigidity and thermal stability.

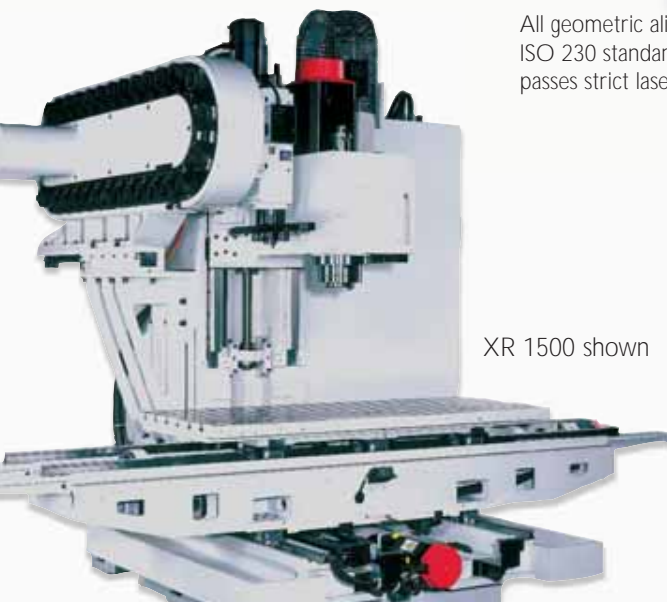
XR 1000 shown

Best-in-class spindle design incorporates five (5) bearings for superior rigidity and overall spindle life—four (4) angular contact bearings on the front; one (1) roller bearing on the rear.

Massive 40- or 50-taper WEISS spindle offers unique grease replenishment system along with a dual-contact (BIG-PLUS) flange fit system.

Oversized high-class 45mm double-nut ballscrews—fixed and pre-tensioned to provide superior machine accuracy and repeatability.

All geometric alignments conform to ISO 230 standards—every machine passes strict laser and ballbar tests.



XR 1500 shown

**Standard features include:**

- 12,000-rpm Spindle Speed
- CT40 or BT40 Taper WEISS Spindle
- BIG-PLUS Face Taper Contact
- High-Retention Draw Bar
- Thermal Compensation<sup>1</sup>
- Chip Auger or Conveyor with Chip Washdown<sup>2</sup>
- Chip Conveyor with Chip Washdown<sup>3</sup>
- Cutter Air Blast
- 300-psi Through-Spindle Coolant<sup>4</sup>
- Rigid Tapping
- 4th Axis Preparation

<sup>1</sup> XR 610, XR 760 and XR 1000 only

<sup>2</sup> Unit supplied as standard varies by market on XR 610

<sup>3</sup> XR 760, XR 1000, XR 1270 and XR 1500

<sup>4</sup> Optional on XR 610 in certain markets

**Optional features include:**

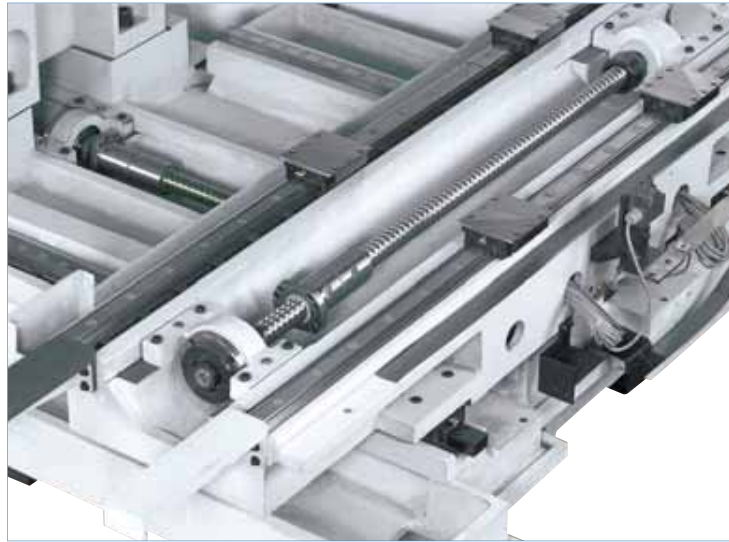
- Larger Capacity ATCs
- Heidenhain iTNC 530 CNC Control
- 15,000-rpm High-Speed Spindle
- Absolute Linear Glass Scales
- Tool Setting Probes
- Spindle Probe
- 4th Axis Interface
- Hardinge 5C and 16C Indexers and Rotary Tables
- Hand-held Manual Pulse Generator

## Heavy-duty linear guideways, ballscrews

and fast tool changes add speed and rigidity

### Heavy-duty linear guideways, ballscrews and axis drives

Wide-spaced, oversized linear guideways provide optimum stiffness with less friction, less heat and less thermal growth for faster traverse rates, longer machine life and greater positioning accuracy. The linear way modules consist of slide members (guide trucks) and linear rails to provide a large load rating, stable accuracy, high rigidity and low friction. The wide spacing between all axes rails provides optimum stiffness for the overall machine structure. Oversized 45mm (1.77") ballscrews are featured on all the XR-Series VMCs shown in this brochure.



### Large capacity, fast performance ATC (Automatic Tool Changer)

To ensure smooth and vibration-free tool changing, all XR-Series machines have their tool changer strategically located for minimal transfer of vibration—a unique design feature. All ATCs feature random-access, bi-directional indexing.



48-tool Swing-arm ATC shown

Model	ATC Tool Positions	ATC Option	Tool Shank Taper
XR 610	24	—	40
XR 760	30	48	40
XR 1000	30	48	40
XR 1270	30	48 or 60	40
XR 1270 HP	30	48 or 60	40
XR 1270 HPD	30	—	50
XR 1500	48	60	40
XR 1500 HP	48	60	40
XR 1500 HPD	30	—	50



30-tool Swing-arm ATC shown



# XR-Series High-Performance Vertical Machining Centers

Unprecedented spindle technology second to none

## Revolutionary WEISS spindle—the latest in spindle technology

XR-Series VMCs are equipped with the very latest, high-performance WEISS spindle technology. The XR 610 through XR 1000 models are supplied with a powerful 12,000-rpm, 18.5-kW (25-hp) belted spindle drive; 30-kW (40-hp) on the XR 1270 and XR 1500 models. Other speeds and drive system options offered.

The XR 1270 HP and XR 1500 HP models feature a directly-coupled 15,000-rpm 30-kW (40-hp) spindle, while the 50-taper XR 1270 HPD and XR 1500 HPD models include a 375-to-7,500-rpm 30-kW (40-hp) gear-box driven spindle. Other speeds available.

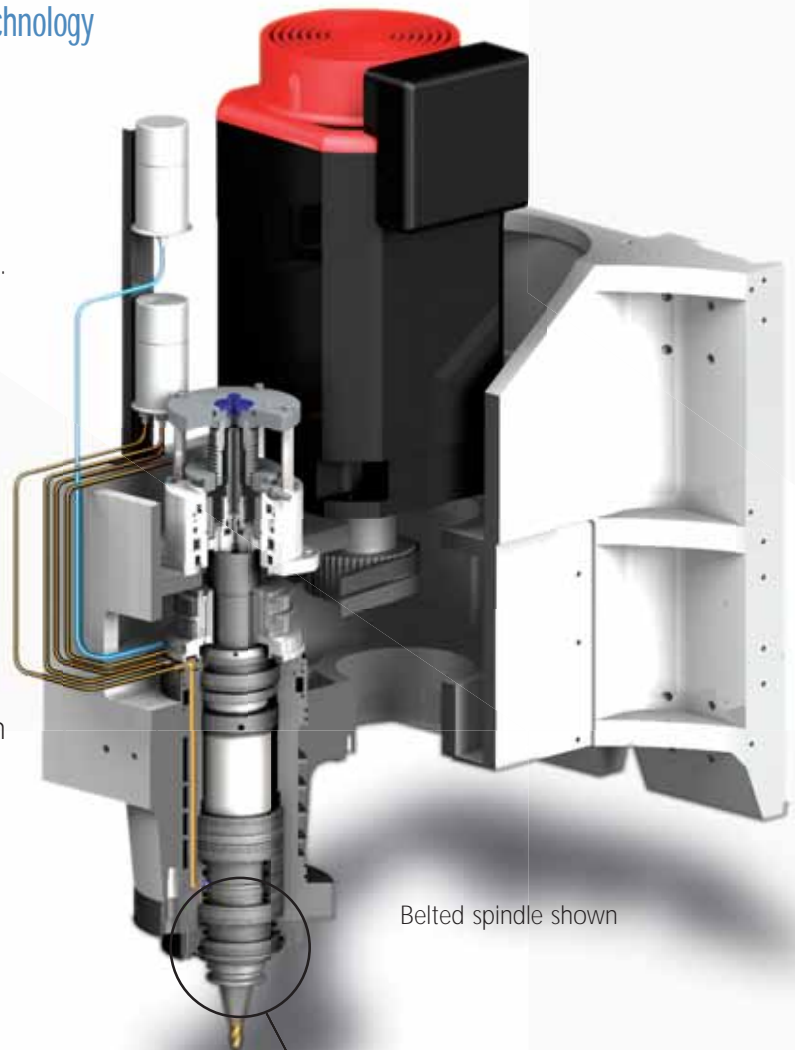
The WEISS directly-coupled spindle configuration reduces spindle inertia and increases accel/decel times for increased productivity. Main features include low vibration and high power density—giving even greater rigidity and radial stiffness. The absence of drive traverse forces permits extremely high accuracy on the workpiece due to smooth, accurate spindle motion even at very low speeds.

## BIG-PLUS dual contact spindle system

The BIG-PLUS spindle system assures higher rigidity, stiffness and accuracy of toolholders in high-speed and difficult machining applications. The dual contact precisely positions the toolholder within 1 micron following a tool change.

### *Elimination of Z-axial movement*

At high rotational spindle speeds, the mouth of the machine spindle can expand slightly due to centrifugal force. As the machine spindle expands, the conventional toolholder, which under constant draw bar pulling pressure, moves further into the spindle. On high tolerance applications, this slight pull back of the cutter can affect dimensional accuracy of the Z-axis. Pull back can also cause the toolholder to get locked into the machine spindle taper. The face contact provided by the BIG-PLUS Spindle System prevents the toolholder from being drawn back into the machine spindle.



Belted spindle shown



Taper Contact

Flange Contact

**BIG-PLUS**  
SPINDLE SYSTEM PAT.  
DUAL CONTACT  
US Patent No. 5,352,073

## Thermally stable system for optimal spindle performance

### Grease lubrication "on-the-fly"

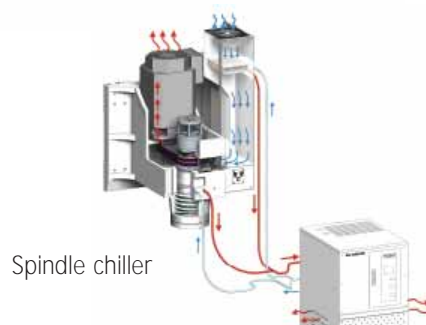
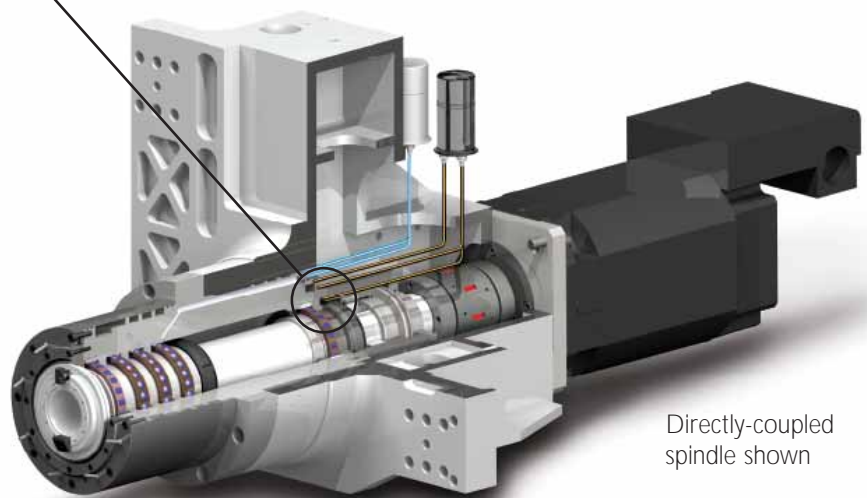
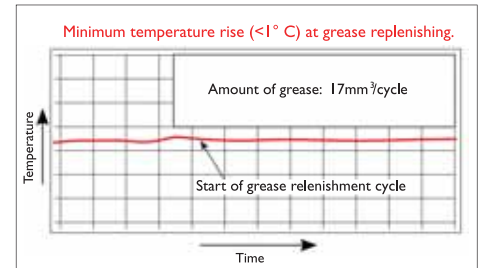
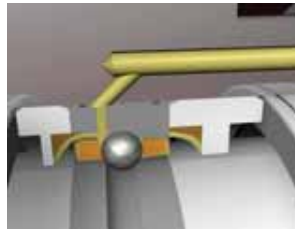
Longer grease life leads to longer spindle service life. Bridgeport XR-Series spindles offer 2-to-3 times longer life due to our grease replenishment technology that keeps the grease quality at a consistently high level. Lubrication cycles are controlled by an external grease replenishing unit, which is triggered based on cumulative spindle run time. Most other brand VMCs have no way to replenish grease. Not so with our system! The grease replenishing unit is integrated in the spindle, thus maintaining a totally sealed spindle. Fresh grease is injected very close to the raceway, pushing older grease away from the bearings. The benefit to this technology is higher permissible bearing preloads, resulting in higher rigidity, higher metal removal rates and the ability to run at higher spindle speeds for longer periods of time.

### Eco Cooling heat exchanger system

This heat exchanger system, which is standard on XR 610, XR 760 and XR 1000 machines, cools the spindle to minimize thermal expansion, prolonging spindle life and allowing higher workpiece accuracy.

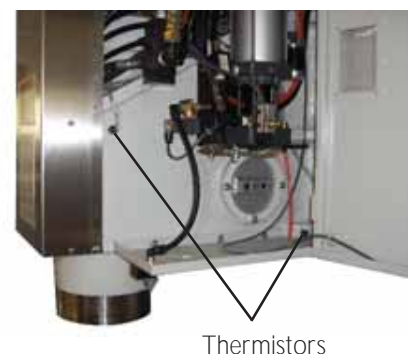
### Spindle chiller

For extreme duty cycles, a spindle chiller offers the best solution to maintain constant spindle temperature. The chiller is standard equipment on all XR 1270 and XR 1500 models (available as an option on all other models).



### Dynamic thermal compensation

To minimize the effects of thermal expansion in the spindle head of XR 610, XR 760 and XR 1000 machines, thermal compensation sensors (thermistors) positioned around the spindle casting are linked directly to the machine's control system. This ensures rapid and real time adjustment to the machine position, thus minimizing the effects of thermal expansion.



# XR-Series High-Performance Vertical Machining Centers

Choose the machine variation that suits your current and future needs



## XR 610

- Travels
  - X-axis - 610mm (24")
  - Y-axis - 510mm (20")
  - Z-axis - 610mm (24")
- Worktable
  - Length - 900mm (35.4")
  - Width - 500mm (19.68")
- Rapid rates (X/Y)—43m/min (1,692ipm)  
(Z)—36m/min (1,417ipm)
- Spindle horsepower
  - 18.5-kW (25-hp) Fanuc
  - 21-kW (28-hp) Heidenhain
- Spindle speeds—12,000-rpm; 40 taper  
9,000- or 15,000-rpm option available
- Fanuc 18i-MB or Heidenhain iTNC 530 control



## XR 760

- Travels
  - X-axis - 760mm (30")
  - Y-axis - 610mm (24")
  - Z-axis - 610mm (24")
- Worktable
  - Length - 900mm (35.4")
  - Width - 600mm (23.6")
- Rapid rates (X/Y)—43m/min (1,692ipm)  
(Z)—36m/min (1,417ipm)
- Spindle horsepower
  - 18.5-kW (25-hp) Fanuc
  - 21-kW (28-hp) Heidenhain
- Spindle speeds—12,000-rpm; 40 taper  
9,000- or 15,000-rpm option available
- Fanuc 18i-MB or Heidenhain iTNC 530 control



## XR 1000

- Travels
  - X-axis - 1020mm (40")
  - Y-axis - 610mm (24")
  - Z-axis - 610mm (24")
- Worktable
  - Length - 1200mm (47.2")
  - Width - 600mm (23.6")
- Rapid rates (X/Y)—43m/min (1,692ipm)  
(Z)—36m/min (1,417ipm)
- Spindle horsepower
  - 18.5-kW (25-hp) Fanuc
  - 21-kW (28-hp) Heidenhain
- Spindle speeds—12,000-rpm; 40 taper  
9,000- or 15,000-rpm option available
- Fanuc 18i-MB or Heidenhain iTNC 530 control

## As your needs grow, Bridgeport has solutions for increased capacity

Whether you're machining simple workpieces, quality molds and dies, or complex prismatic parts, we've got just the right Bridgeport XR-Series machining center for your operation. Bridgeport XR machines easily satisfy the most demanding production and precision component machining requirements in the aerospace, automotive, mold and toolmaking, power engineering and oil/gas sectors to name a few.

The XR 610 is a highly rigid machine in a small footprint. When a larger working cube is required, then the XR 760 is ideal. This model has the best Y-axis travel in the industry for a VMC in its size. When more X-axis travel is needed, then the XR 1000 satisfies the requirement nicely. Rounding out the XR-Series line is our larger XR 1270 and XR 1500 models—available with either a 40- or

50-taper spindle. These robust machines offer exceptional stiffness and rigidity to deliver outstanding results in the most demanding production environments. They are particularly well suited to machine exotic metals, such as Titanium and Nimonic (nickel-based alloys).

To further increase productivity, XR-Series VMCs are configured for 4-axis machining via an optional interface and rotary table.



### XR 1270

- Travels
  - X-axis - 1270mm (50")
  - Y-axis - 700mm (27.55")
  - Z-axis - 610mm (24")
- Worktable
  - Length - 1397mm (55")
  - Width - 700mm (27.55")
- Rapid rates (x/y/z)—36m/min (1,417ipm)
- Spindle horsepower—30-kW (40-hp) (Fanuc and Heidenhain)
- Spindle speeds—12,000-rpm; 40 taper 9,000- or 15,000-rpm option available HP model—15,000-rpm; 40 taper HPD model—7,500-rpm; 50 taper
- Fanuc 18i-MB or Heidenhain iTNC 530 control



### XR 1500

- Travels
  - X-axis - 1500mm (59.05")
  - Y-axis - 700mm (27.55")
  - Z-axis - 610mm (24")
- Worktable
  - Length - 1702mm (67")
  - Width - 700mm (27.55")
- Rapid rates (x/y/z)—36m/min (1,417ipm)
- Spindle horsepower—30-kW (40-hp) (Fanuc and Heidenhain)
- Spindle speeds—12,000-rpm; 40 taper 9,000- or 15,000-rpm option available HP model—15,000-rpm; 40 taper HPD model—7,500-rpm; 50 taper
- Fanuc 18i-MB or Heidenhain iTNC 530 control



# XR-Series High-Performance Vertical Machining Centers

Advanced digital control systems to unleash your productivity



## Fanuc 18i-MB Control—Standard

- 264mm (10.4") LCD Color Monitor
- AI Nano Contour Control—High-Speed Machining Software
  - Bell Shaped ACC/DEC after cutting feed interpolation
  - Advanced Feed Forward Control
  - Auto Corner Override and more
- HRV3—allows for fine digital tuning of the servo drives
- Dynamic Graphic Display
- Ethernet Ready
- PCMCIA Card Slot—can be used to run large files directly from a memory card
- Manual Pulse Generator
- Part Program Memory 256KB (640M)
- Rigid Tapping
- Extended Editing Functions—cut, copy and merge
- Tool Life Management
- Custom Macro B—Parametric Part Programming (Part Families)
- Tool Offset type C—Separate Length and Diameter
- Tool Offsets—200 pairs
- Tool Length Measurement
- Cutter Compensation Type C
- 200 Registered Programs
- Run Hour and Parts Count Display
- Helical Interpolation
- Work Coordinate Systems (G54-G59)
- Additional Work Coordinate System (G54.1–G54.48)
- Coordinate System Rotation
- Scaling
- Programmable Mirror Image
- Program Restart (Mid program restart)
- Chamfering and Corner Rounding
- Background Editing
- Program input of offset data (G10)
- Embedded Macro Function
- Reader/Puncher Interface (RS232)
- Stroke Limit Check prior to move
- Pitch Error Compensation
- Controlled Axis Expansion—used for the 4th axis
- Simultaneously Controlled Axis Expansion—used for the 4th axis
- High Speed Skip
- Inch/Metric Conversion



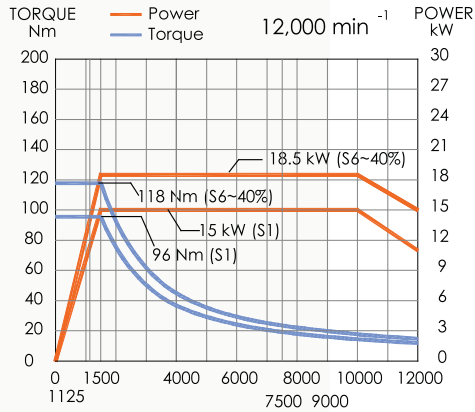
## Heidenhain iTNC 530 Control—Option\*

- 383mm (15.1") TFT Color Flat Panel Display with Soft Keys
- Program Memory Hard Disk (Minimum 6GB)
- Interpolation
  - Straight Line in 4 Axes
  - Helix: Combination of Circular and Linear Motion
  - Circle in 2 Axes
- 3.6ms Block Processing Time
- Data Interfaces
- Heidenhain Conversational Programming as per ISO
- Tool Compensation
- Several Tool Tables with Any Number of Tools
- Cutting Data Tables
- Constant Contouring Speed
- Parallel Operation—create programs with graphic support while another program is running
- Contour Elements—line segment, chamfer, circular arc, circle center, circle radius, tangentially connecting circular arc and corner rounding
- Contour Approach and Departure
- FK Free Contour Programming
- Program Jumps
- Fixed Cycles
- Coordinate Transformations
- Q Parameters
- Programming Aids
- Actual Position Capture
- Verification Graphics
- Programming Graphics
- Program Run Graphics
- Machining Time
- Returning to the Contour
- Datum Tables
- Pallet Tables
- Touch Probe Cycles
- Preset Table

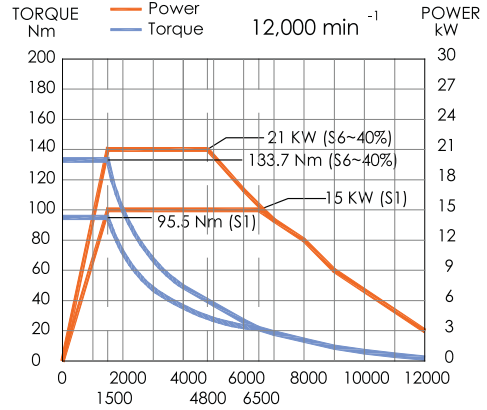
\* Availability limited to certain countries

# Spindle drives that provide the power and torque to machine the toughest materials

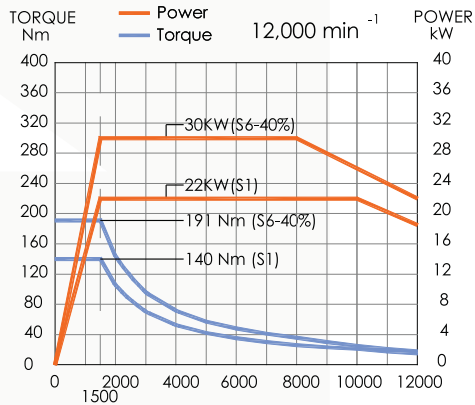
## 12,000-rpm Belted Spindle with Fanuc Control XR 610, XR 760 and XR 1000



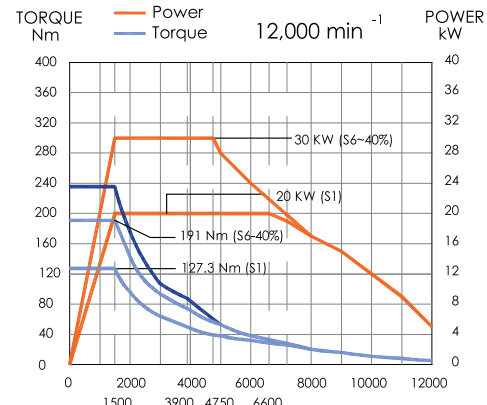
## 12,000-rpm Belted Spindle with Heidenhain Control XR 610, XR 760 and XR 1000



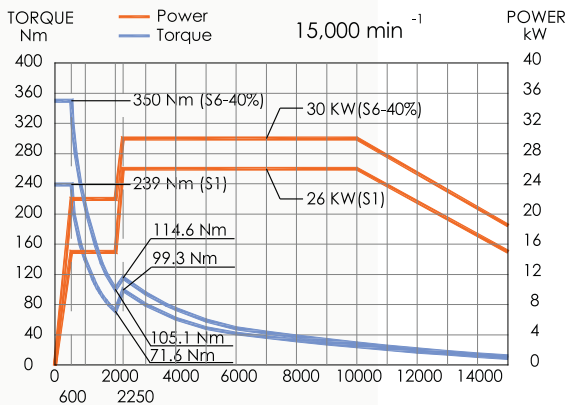
## 12,000-rpm Belted Spindle with Fanuc Control XR 1270 and XR 1500



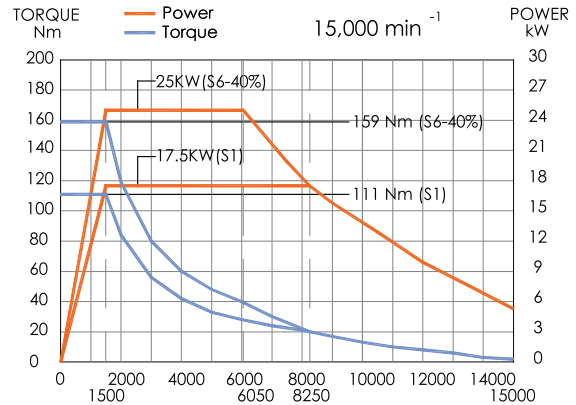
## 12,000-rpm Belted Spindle with Heidenhain Control XR 1270 and XR 1500



## 15,000-rpm Directly-Coupled Spindle with Fanuc Control XR 1270 HP and XR 1500 HP



## 15,000-rpm Directly-Coupled Spindle with Heidenhain Control XR 1270 HP and XR 1500 HP



See pages 14 and 15 for a complete listing of spindle drives available.

# XR-Series High-Performance Vertical Machining Centers

## Optional Rotary Solutions by Hardinge

Increase your productivity by adding affordable automation to your machining center for rapid positioning of single or multiple part setups.



### Enhanced, entry-level 5C<sup>2</sup> Rotary Systems

- Beefy, dual-bearing spindle for heavier radial and axial loads
- 5C<sup>2</sup> single, dual, triple & quad, trunnion and 2-axis configurations
- Industry compatible for drop-in replacement
- 360 degrees-per-second
- Hardinge threaded-nose 5C spindle

### Flexible, quick-change 16C and 3J Rotary Systems

- Beefy, dual-bearing spindle for heavier radial and axial loads
- 16C and 3J single, dual & triple, trunnion and 2-axis configurations
- A2-5, 16C or 3J collet-ready spindle
- 5C adapter available for small part processing

### Zero backlash, gearless, Direct-Drive Rotary Systems

- Rare-earth, permanent magnet wraparound torque motor
- Rapid bidirectional movement
- High servo stiffness
- High-speed and Super-Precision<sup>®</sup> positioning and repeatability
- Direct-mount  $\pm .077$  arc-sec high resolution encoder
- DD100, DD200 & DD300, trunnion and 2-axis configurations

Hardinge Rotary Systems can be integrated into the machine, operating in a fully interpolated fashion with the other axes of the machine. The machining center must be configured for immediate or future 4th-axis operation. Refer to brochure 2372 for a complete rotary product offering with dimensions and specifications.



### The most flexible Quick-Change workholding concept on the market...

Hardinge's collet-ready spindle nose design allows quick change between collets, expanding collets, step chucks, 3-jaw chucks and face plates. Common spindle tooling can be shared between the Hardinge Rotary System(s) and a lathe. The gripping is in the spindle, closest to the spindle bearings, unlike surface-mounted adapters used on traditional rotary tables. Multiple workholding options provide alternate gripping solutions for increased precision and capability.

## The Hardinge Group™ . . .

Bridgeport® milling machines, Hardinge turning centers,  
Hauser, Kellenberger®, Tripet and Tschudin grinding machines,  
and Workholding and industrial products

The Hardinge Group produces more than just the XR-Series machining centers shown in this brochure. . .we build a full range of value-packed and high-precision turning centers; vertical and horizontal machining centers; high-speed and 5-axis milling machines; creep-feed, jig, universal cylindrical and ID/OD grinding machines; and workholding systems and equipment. Hardinge machine tool technology is not only the most comprehensive on the market, it's also creating new benchmarks for quality, productivity and reliability.

Whether you are an OEM or sub-contract precision engineering company—regardless of the sectors you serve (aerospace, automotive, medical, autosport, mold, tool and die or general engineering)—the Hardinge product portfolio will interest you.

Our advanced manufacturing technologies in combination with our range of after-sales and support services (maintenance and service contracts; operator training; technical and applications support) have been designed to help you improve your performance and maintain your competitive advantage.

If you would like to know more about our manufacturing solutions, please contact us at the nearest location listed on the back cover.



### Hardinge standard, performance and high-performance turning centers

We can help you turn your business around! From

our competitively-priced standard SV-Series machines to



our performance GS-Series and ELITE®-Series range of quick-changeover bar and chucking machines right through to our high-performance QUEST® GT gang tool, RS- and SR-Series multi-tasking machines, we can provide you with the optimum turning solution.



### Bridgeport standard, performance and high-performance milling machines and machining centers

Our comprehensive line of Bridgeport milling machines have been designed to meet any manufacturing challenge you might be facing today or in the future. Our market-leading XR-Series of vertical machining centers continue to grow in popularity—and



we have similar expectations with our new competitively-priced XV and GX VMCs as well. For heavy-duty, high metal removal we offer our HMC range of Horizontal Machining Centers and for increased manufacturing flexibility and improved productivity there's our 5-axis (5AX) model that is well worthy of consideration. If you are making your first step up to CNC machining, you will find that our entry-level GX 480 and GX 480 DT machines provide the ideal solution. For high-speed machining applications, our HSC machining centers are second to none.



### Kellenberger, Hauser, Tripet and Tschudin grinding machines

The Hardinge grinding companies include Hauser, Kellenberger, Tripet, Tschudin and, most recently, Bridgeport. Collectively we have all the technology, experience and know-how you need to



transform your manufacturing operations. From high-performance cylindrical and jig grinding machines through to multi-functional ID/OD and universal machines—not to mention Bridgeport's state-of-the-art Flexible Grinding Centers (FGC 2). It doesn't get more comprehensive than this.



### Hardinge workholding and industrial products

Because we design and manufacture market-leading, technically-excellent machine tools it's no surprise that we know more than a thing or two about



workholding solutions. From our extensive portfolio of CNC toolholders, collets and chucks—right through to our 5C Indexing systems—our workholding and fixturing technology will improve your performance when and where it matters most.



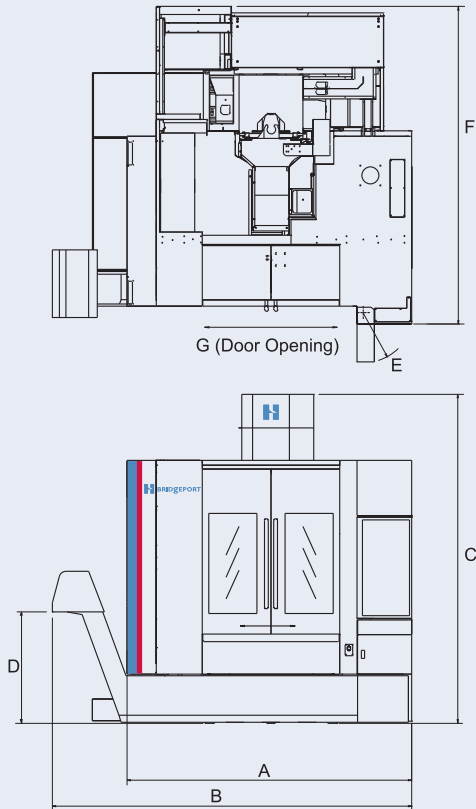
### Hardinge rotary products





# XR-Series High-Performance Vertical Machining Centers

## Floor plan



XR 1000 floor plan shown.

Note: Metric (Inch) Measurements shown

Dim.	XR 610	XR 760	XR 1000	XR 1270	XR 1500
A	2020 (79.5)	2150 (85)	2528 (99)	2895 (114)	3695 (145)
B	2511 (99)*	2844 (112)	3192 (126)	3675 (144)	4500 (177)
C	2851 (112)	2921 (115)	2921 (115)	2950 (116)**	3020 (119)**
D	465 (18)*	975 (38.4)	975 (38.4)	1150 (45)	1150 (45)
E	445 (17.5)	445 (17.5)	445 (17.5)	—	—
F	2743 (108)	3000 (118)	3000 (118)	2635 (104)**	2635 (104)**
G	815 (32)	950 (37)	1100 (43)	1400 (55)	1700 (66)

\* B = Distance to end of auger; D = Height to opening of auger.

\*\* See listing for actual dimension of HP and HPD models.

1—Includes Oil Chiller.

2—Unit supplied as standard varies by market.

3—Other voltages require external transformer.

4—Optional in certain markets.

	XR 610	XR 760
<b>Axis Travel</b>		
Table (X axis)	610mm (24")	760mm (30")
Saddle (Y axis)	510mm (20")	610mm (24")
Head (Z axis)	610mm (24")	610mm (24")
Table Surface to Spindle Gauge Plane Distance (Min to Max)	100 to 710mm (3.94" to 27.95")	100 to 710mm (3.94" to 27.95")
<b>Positioning</b>		
Auto Mode (X and Y axes)	43m/min (1,692ipm)	43m/min (1,692ipm)
Auto Mode (Z axis)	36m/min (1,417ipm)	36m/min (1,417ipm)
Feedrate Range (X and Y axes)	.0025 - 20 m/min (0.1-787 ipm)	.0025 - 20 m/min (0.1-787 ipm)
Feedrate Range (Z axis)	.0025 - 20 m/min (0.1-787 ipm)	.0025 - 20 m/min (0.1-787 ipm)
Minimum Increment	.001mm (.00004")	.001mm (.00004")
Ball Screw Dia. and Pitch (X and Y axes)	45 x 16mm (1.77" x .629")	45 x 16mm (1.77" x .629")
(Z axis)	45 x 12mm (1.77" x .472")	45 x 12mm (1.77" x .472")
<b>Spindle</b>		
	12,000 rpm Belted	12,000 rpm Belted
Fanuc—Motor Power Rating (S6-40%)	18.5kW (25hp)	18.5kW (25hp)
Torque (S6-40%)	118Nm (87ft-lb)	118Nm (87ft-lb)
Heidenhain—Motor Power Rating (S6-40%)	21kW (28hp)	21kW (28hp)
Torque (S6-40%)	134Nm (98ft-lb)	134Nm (98ft-lb)
Retention Force	12,010N (2,700 lbf)	12,010N (2,700 lbf)
Spindle Taper	No. 40	No. 40
Tool Holder	CT40 or BT40	CT40 or BT40
<b>Spindle Options</b>		
Speed (Belted)	9,000 rpm	9,000 rpm
Fanuc—Motor Power Rating (S6-40%)	18.5kW (25hp)	18.5kW (25hp)
Torque (S6-40%)	157Nm (116ft-lb)	157Nm (116ft-lb)
Heidenhain—Motor Power Rating (S6-40%)	21kW (28hp)	21kW (28hp)
Torque (S6-40%)	178Nm (131ft-lb)	178Nm (131ft-lb)
Speed (Belted)	15,000 rpm <sup>1</sup>	15,000 rpm <sup>1</sup>
Fanuc—Motor Power Rating (S6-40%)	18.5kW (25hp)	18.5kW (25hp)
Torque (S6-40%)	94Nm (70ft-lb)	94Nm (70ft-lb)
Heidenhain—Motor Power Rating (S6-40%)	21kW (28hp)	21kW (28hp)
Torque (S6-40%)	107Nm (79ft-lb)	107Nm (79ft-lb)
Speed (Directly Coupled)	—	15,000 rpm <sup>1</sup>
Fanuc—Motor Power Rating (S6-40%)	—	22kW (30hp)
Torque (S6-40%)	—	150Nm (110ft-lb)
Heidenhain—Motor Power Rating (S6-40%)	—	25kW (33hp)
Torque (S6-40%)	—	159Nm (117ft-lb)
<b>Worktable</b>		
Working Surface	900 x 500mm (35.4 x 19.68")	900 x 600mm (35.4 x 23.6")
Table Load	500kg (1,100lb)	700kg (1,540lb)
Number of T-Slots	5	5
T-Slot Size	18mm (.708")	18mm (.708")
T-Slot Center Dimension	100mm (3.937")	100mm (3.937")
<b>Control—Fanuc</b>		
	18i-MB	18i-MB
<b>Optional Heidenhain</b>		
	iTNC 530	iTNC 530
<b>Automatic Tool Changer</b>		
Magazine Capacity	24 Tools	30 Tools (48 opt)
Tool Select by Shortest Path and Random Select	Bi-Directional	Bi-Directional
Max. Tool Diameter	125mm (4.92")	125mm (4.92")
(adjacent pockets)	80mm (3.15")	85mm (3.35")
Max. Tool Length	300mm (11.81")	300mm (11.81")
Max. Tool Weight	7kg (15.43lb)	7kg (15.43lb)
Random Change Time (chip-to-chip)—ISO 10791-9	4 sec.	4 sec.
<b>Coolant and Chip Management</b>		
Swarf Removal	Chip Auger or Conveyor <sup>2</sup>	Chip Conveyor
Coolant Tank Capacity	300L (79 US gal)	300L (79 US gal)
Wash Down	Standard	Standard
Wash Gun	Standard	Standard
Stainless Chip Pan	Not Available	Standard
Cutter Air Blast	Standard	Standard
Through Spindle Coolant	Prepped	Standard
<b>Accuracy—ISO 230-2</b>		
Positioning - A	0.010mm (0.0004")	0.010mm (0.0004")
Repeatability - R	0.004mm (0.00016")	0.004mm (0.00016")
<b>Linear Scales Option</b>		
Positioning	0.006mm (0.00024")	0.006mm (0.00024")
Repeatability	0.003mm (0.00012")	0.003mm (0.00012")
<b>Machine Size</b>		
Machine Dimensions (WxD)	2020 x 2743mm (79.5" x 108")	2150 x 3000mm (85" x 118")
Height	2851mm (112")	2921mm (115")
Mass of Machine	5500kg (12,100lb)	6000kg (13,200lb)
<b>Installation Specifications</b>		
Electrical Supply (Input)—Balanced 3-phase	50 or 60 Hz	50 or 60 Hz
Power	30 KVA	30 KVA
Voltage <sup>3</sup>	208 - 230 or 380 - 440 volt	208 - 230 or 380 - 440 volt
Compressed Air (Pressure / Flow)	80 psi / 4.9 cfm	80 psi / 4.9 cfm
	5.5 bar / 140 L/min	5.5 bar / 140 L/min
Through Spindle Coolant Pressure	20 bar (300 psi) <sup>4</sup>	20 bar (300 psi) Std
Nozzle Coolant	60 L/min (15.8 gal/min)	60 L/min (15.8 gal/min)
Wash Down	125 L/min (33 gal/min)	125 L/min (33 gal/min)

# Specifications

XR 1000	XR 1270	XR 1270 HP	XR 1270 HPD	XR 1500	XR 1500 HP	XR 1500 HPD
1020mm (40")	1270mm (50")	1270mm (50")	1270mm (50")	1500mm (59.05")	1500mm (59.05")	1500mm (59.05")
610mm (24")	700mm (27.55")	700mm (27.55")	700mm (27.55")	700mm (27.55")	700mm (27.55")	700mm (27.55")
610mm (24")	610mm (24")	610mm (24")	610mm (24")	610mm (24")	610mm (24")	610mm (24")
100 to 710mm (3.94" to 27.95")	150 to 760mm (5.9" to 29.9")	150 to 760mm (5.9" to 29.9")	190 to 800mm (7.48" to 31.5")	150 to 760mm (5.90" to 29.9")	150 to 760mm (5.90" to 29.9")	190 to 800mm (7.48" to 31.5")
43m/min (1,692ipm)	36m/min (1,417ipm)	36m/min (1,417ipm)	36m/min (1,417ipm)	36m/min (1,417ipm)	36m/min (1,417ipm)	36m/min (1,417ipm)
36m/min (1,417ipm)	36m/min (1,417ipm)	36m/min (1,417ipm)	36m/min (1,417ipm)	36m/min (1,417ipm)	36m/min (1,417ipm)	36m/min (1,417ipm)
.0025 - 20 m/min (0.1-787 ipm)	.0025 - 20 m/min (0.1-787 ipm)	.0025 - 20 m/min (0.1-787 ipm)	.0025 - 20 m/min (0.1-787 ipm)	.0025 - 20 m/min (0.1-787 ipm)	.0025 - 20 m/min (0.1-787 ipm)	.0025 - 20 m/min (0.1-787 ipm)
.0025 - 20 m/min (0.1-787 ipm)	.0025 - 20 m/min (0.1-787 ipm)	.0025 - 20 m/min (0.1-787 ipm)	.0025 - 20 m/min (0.1-787 ipm)	.0025 - 20 m/min (0.1-787 ipm)	.0025 - 20 m/min (0.1-787 ipm)	.0025 - 20 m/min (0.1-787 ipm)
.001mm (0.00004")	.001mm (0.00004")	.001mm (0.00004")	.001mm (0.00004")	.001mm (0.00004")	.001mm (0.00004")	.001mm (0.00004")
45 x 16mm (1.77" x .629")	45 x 12mm (1.77" x .472")	45 x 12mm (1.77" x .472")	45 x 12mm (1.77" x .472")	45 x 12mm (1.77" x .472")	45 x 12mm (1.77" x .472")	45 x 12mm (1.77" x .472")
45 x 12mm (1.77" x .472")	45 x 12mm (1.77" x .472")	45 x 12mm (1.77" x .472")	45 x 12mm (1.77" x .472")	45 x 12mm (1.77" x .472")	45 x 12mm (1.77" x .472")	45 x 12mm (1.77" x .472")
12,000 rpm Belted	12,000 rpm Belted <sup>1</sup>	15,000 rpm Direct <sup>1</sup>	375 - 7,500 rpm Gear Box <sup>1</sup>	12,000 rpm Belted <sup>1</sup>	15,000 rpm Direct <sup>1</sup>	375 - 7,500 rpm Gear Box <sup>1</sup>
18.5kW (25hp)	30kW (40hp)	30kW (40hp)	30kW (40hp)	30kW (40hp)	30kW (40hp)	30kW (40hp)
118Nm (87ft-lb)	191Nm (141ft-lb)	350Nm (258ft-lb)	764Nm (562ft-lb)	191Nm (141ft-lb)	350Nm (258ft-lb)	764Nm (562ft-lb)
21kW (28hp)	30kW (40hp)	25kW (34hp)	30kW (40hp)	30kW (40hp)	25kW (34hp)	30kW (40hp)
134Nm (98ft-lb)	191Nm (141ft-lb)	159Nm (117ft-lb)	764Nm (562ft-lb)	191Nm (141ft-lb)	159Nm (117ft-lb)	764Nm (562ft-lb)
12,010N (2,700 lbf)	12,010N (2,700 lbf)	12,010N (2,700 lbf)	25,000N (5,600 lbf)	12,010N (2,700 lbf)	12,010N (2,700 lbf)	25,000N (5,600 lbf)
No. 40	No. 40	No. 40	No. 50	No. 40	No. 40	No. 50
CT40 or BT40	CT40 or BT40	CT40 or BT40	CT50 or BT50	CT40 or BT40	CT40 or BT40	CT50 or BT50
9,000 rpm	9,000 rpm	—	—	9,000 rpm	—	—
18.5kW (25hp)	30kW (40hp)	—	—	30kW (40hp)	—	—
157Nm (116ft-lb)	255Nm (187ft-lb)	—	—	255Nm (187ft-lb)	—	—
21kW (28hp)	30kW (40hp)	—	—	30kW (40hp)	—	—
178Nm (131ft-lb)	255Nm (187ft-lb)	—	—	255Nm (187ft-lb)	—	—
15,000 rpm <sup>1</sup>	15,000 rpm <sup>1</sup>	—	—	15,000 rpm <sup>1</sup>	—	—
18.5kW (25hp)	30kW (40hp)	—	—	30kW (40hp)	—	—
94Nm (70ft-lb)	153Nm (112ft-lb)	—	—	153Nm (112ft-lb)	—	—
21kW (28hp)	30kW (40hp)	—	—	30kW (40hp)	—	—
107Nm (79ft-lb)	153Nm (112ft-lb)	—	—	153Nm (112ft-lb)	—	—
15,000 rpm <sup>1</sup>	—	15,000 rpm <sup>1</sup>	—	—	15,000 rpm <sup>1</sup>	—
22kW (30hp)	—	30kW (40hp)	—	—	30kW (40hp)	—
150Nm (110ft-lb)	—	350Nm (258ft-lb)	—	—	350Nm (258ft-lb)	—
25kW (33hp)	—	25kW (33hp)	—	—	25kW (33hp)	—
159Nm (117ft-lb)	—	159Nm (117ft-lb)	—	—	159Nm (117ft-lb)	—
1200 x 600mm (47.2 x 23.6")	1400 x 700mm (55 x 27.55")	1400 x 700mm (55 x 27.55")	1400 x 700mm (55 x 27.55")	1700 x 700mm (67 x 27.55")	1700 x 700mm (67 x 27.55")	1700 x 700mm (67 x 27.55")
900kg (2,000lb)	1200kg (2,640lb)	1200kg (2,640lb)	1200kg (2,640lb)	1500kg (3,300lb)	1500kg (3,300lb)	1500kg (3,300lb)
5	6	6	6	6	6	6
18mm (.708")	18mm (.708")	18mm (.708")	18mm (.708")	18mm (.708")	18mm (.708")	18mm (.708")
100mm (3.937")	100mm (3.937")	100mm (3.937")	100mm (3.937")	100mm (3.937")	100mm (3.937")	100mm (3.937")
18i-MB	18i-MB	18i-MB	18i-MB	18i-MB	18i-MB	18i-MB
iTNC 530	iTNC 530	iTNC 530	iTNC 530	iTNC 530	iTNC 530	iTNC 530
30 Tools (48 opt)	30 Tools (48 or 60 opt)	30 Tools (48 or 60 opt)	30 Tools	48 Tools (60 opt)	48 Tools (60 opt)	30 Tools
Bi-Directional	Bi-Directional	Bi-Directional	Bi-Directional	Bi-Directional	Bi-Directional	Bi-Directional
125mm (4.92")	125mm (4.92")	125mm (4.92")	200mm (7.87")	125mm (4.92")	125mm (4.92")	200mm (7.87")
85mm (3.35")	80mm (3.15")	80mm (3.15")	125mm (4.92")	80mm (3.15")	80mm (3.15")	125mm (4.92")
300mm (11.81")	300mm (11.81")	300mm (11.81")	350mm (13.81")	300mm (11.81")	300mm (11.81")	350mm (13.81")
7kg (15.43lb)	7kg (15.43lb)	7kg (15.43lb)	15kg (33lb)	7kg (15.43lb)	7kg (15.43lb)	15kg (33lb)
4 sec.	5.5 sec.	5.5 sec.	9 sec.	5.5 sec.	5.5 sec.	9 sec.
Chip Conveyor	Chip Conveyor	Chip Conveyor	Chip Conveyor	Chip Conveyor	Chip Conveyor	Chip Conveyor
400L (105 US gal)	600L (158 US gal)	600L (158 US gal)	600L (158 US gal)	600L (158 US gal)	600L (158 US gal)	600L (158 US gal)
Standard	Standard	Standard	Standard	Standard	Standard	Standard
Standard	Standard	Standard	Standard	Standard	Standard	Standard
Standard	Standard	Standard	Standard	Standard	Standard	Standard
Standard	Standard	Standard	Standard	Standard	Standard	Standard
Standard	Standard	Standard	Standard	Standard	Standard	Standard
0.010mm (0.0004")	0.015mm (0.00059")	0.015mm (0.00059")	0.015mm (0.00059")	0.015mm (0.00059")	0.015mm (0.00059")	0.015mm (0.00059")
0.004mm (0.00016")	0.008mm (0.00031")	0.008mm (0.00031")	0.008mm (0.00031")	0.008mm (0.00031")	0.008mm (0.00031")	0.008mm (0.00031")
0.006mm (0.00024")	0.008mm (0.00031")	0.008mm (0.00031")	0.008mm (0.00031")	0.008mm (0.00031")	0.008mm (0.00031")	0.008mm (0.00031")
0.003mm (0.00012")	0.004mm (0.00016")	0.004mm (0.00016")	0.004mm (0.00016")	0.004mm (0.00016")	0.004mm (0.00016")	0.004mm (0.00016")
2528 x 3000mm (99" x 118")	2895 x 2635mm (114" x 104")	2895 x 2635mm (114" x 104")	2895 x 3250mm (114" x 128")	3695 x 2635mm (145" x 104")	3695 x 2635mm (145" x 104")	3695 x 3250mm (145" x 128")
2921mm (115")	2950mm (116")	3200mm (126")	3250mm (128")	3020mm (119")	3270mm (129")	3320mm (131")
7000kg (15,400lb)	9000kg (19,800lb)	9000kg (19,800lb)	9600kg (21,120lb)	10,000kg (22,000lb)	10,000kg (22,000lb)	10,600kg (23,320lb)
50 or 60 Hz	50 or 60 Hz	50 or 60 Hz	50 or 60 Hz	50 or 60 Hz	50 or 60 Hz	50 or 60 Hz
30 KVA	40 KVA	40 KVA	40 KVA	40 KVA	40 KVA	40 KVA
208 - 230 or 380 - 440 volt	208 - 230 or 380 - 440 volt	208 - 230 or 380 - 440 volt	208 - 230 or 380 - 440 volt	208 - 230 or 380 - 440 volt	208 - 230 or 380 - 440 volt	208 - 230 or 380 - 440 volt
80 psi / 4.9 cfm	80 psi / 4.9 cfm	80 psi / 4.9 cfm	80 psi / 4.9 cfm	80 psi / 4.9 cfm	80 psi / 4.9 cfm	80 psi / 4.9 cfm
5.5 bar / 140 L/min	5.5 bar / 140 L/min	5.5 bar / 140 L/min	5.5 bar / 140 L/min	5.5 bar / 140 L/min	5.5 bar / 140 L/min	5.5 bar / 140 L/min
20 bar (300 psi) Std	20 bar (300 psi) Std	20 bar (300 psi) Std	20 bar (300 psi) Std	20 bar (300 psi) Std	20 bar (300 psi) Std	20 bar (300 psi) Std
60 L/min (15.8 gal/min)	60 L/min (15.8 gal/min)	60 L/min (15.8 gal/min)	60 L/min (15.8 gal/min)	60 L/min (15.8 gal/min)	60 L/min (15.8 gal/min)	60 L/min (15.8 gal/min)
125 L/min (33 gal/min)	60 L/min (15.8 gal/min)	60 L/min (15.8 gal/min)	60 L/min (15.8 gal/min)	60 L/min (15.8 gal/min)	60 L/min (15.8 gal/min)	60 L/min (15.8 gal/min)



Over the years, The Hardinge Group™ steadily diversified both its product offerings and operations. Today, the company has grown into a globally diversified player with manufacturing operations in North America, Europe and Asia. In addition to designing and building turning centers and collets, Hardinge is a world leader in grinding solutions with the addition of the Kellenberger, Hauser, Tripet and Tschudin brands to the Hardinge family. The company also manufactures Bridgeport machining centers and other industrial products for a wide range of material cutting, turnkey automation and workholding needs.

Expect more from your Hardinge products.  
Choose Hardinge precision and reliability for increased productivity and value!

Call us today, we've got your answer.

## Hardinge Companies Worldwide

### Canada

Canadian Hardinge Machine Tools Ltd.  
7111 Kennedy Road  
Mississauga, Ontario  
Canada L5S 0A4  
Phone: 905.624.8252  
Fax: 905.624.8494  
web site: [www.hardingecanada.com](http://www.hardingecanada.com)

### Germany

Hardinge GmbH  
Saalestrasse 20  
47800 Krefeld  
Germany  
Phone: (49) 2151 496490  
Fax: (49) 2151 4964999

### Holland

Hardinge-Holland  
P.O. Box 346  
4940 AH Raamsdonkveer  
Holland  
Phone: +31 (0) 1625 19565  
Fax: +31 (0) 1625 19575  
e-mail: [info@bridgeport.nl](mailto:info@bridgeport.nl)

### Switzerland

L. Kellenberger & Co. AG  
Heiligkreuzstrasse 28  
CH-9009 St. Gallen  
Switzerland  
Phone: 41 071 242 91 11  
Fax: 41 071 242 92 22  
e-mail: [info@kellenberger.com](mailto:info@kellenberger.com)  
web site: [www.kellenberger.com](http://www.kellenberger.com)

Hardinge Group Europe  
Kellenberger HTT (Hauser Tripet Tschudin)  
Längfeldweg 107  
CH-2500 Biel-Bienne 8  
Switzerland  
Phone: ++41 (0)32 344 11 52  
Fax Sales Department :  
+41 (0)32 341 13 93  
Fax Service Department:  
+41 (0)32 342 25 36  
e-mail: [info@htt.ch](mailto:info@htt.ch)  
web site: [www.httgrinding.com](http://www.httgrinding.com)

### United Kingdom

Bridgeport  
Hardinge Machine Tools, Ltd.  
Whiteacres  
Cambridge Road  
Whetstone  
Leicester  
LE8 6BD England  
Tel: +44 (0)116 2869900  
Fax: +44 (0)116 2869901  
Bridgeport e-mail: [sales@bpt.com](mailto:sales@bpt.com)  
Bridgeport web site: [www.bpt.com](http://www.bpt.com)  
Hardinge e-mail: [sales@hardinge.co.uk](mailto:sales@hardinge.co.uk)  
Hardinge web site: [www.hardinge.co.uk](http://www.hardinge.co.uk)

### China

Hardinge Machine (Shanghai) Co. Ltd.  
Hardinge China Limited  
No.1388 East Kang Qiao Road  
Pudong, Shanghai 201319  
Tel: 0086 21 38108686  
Fax: 0086 21 38108681

### Taiwan

Hardinge Taiwan Precision Machinery Ltd.  
4 Tzu Chiang 3rd Road  
Nan Tou City  
540 Taiwan, R.O.C.  
Phone: 886 49 2260536  
Fax: 886 49 2252203  
e-mail: [cs@hardinge.com.tw](mailto:cs@hardinge.com.tw)

### United States

Hardinge Inc.  
One Hardinge Drive  
Elmira, NY 14902-1507 USA  
General Information: 607-734-2281  
Sales: 800.843.8801  
Sales Fax: 607.734.8819  
Workholding Fax: 607.734.3886  
Service: 800.424.2440  
web site: [www.hardinge.com](http://www.hardinge.com)