

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA**



**“OPTIMIZACIÓN DEL DESGASTE DE LA HERRAMIENTA EN UNA TALLADORA  
DE ENGRANAJES CNC UTILIZANDO EL MÉTODO TAGUCHI Y ANÁLISIS DE LA  
VARIANZA (ANOVA)”**

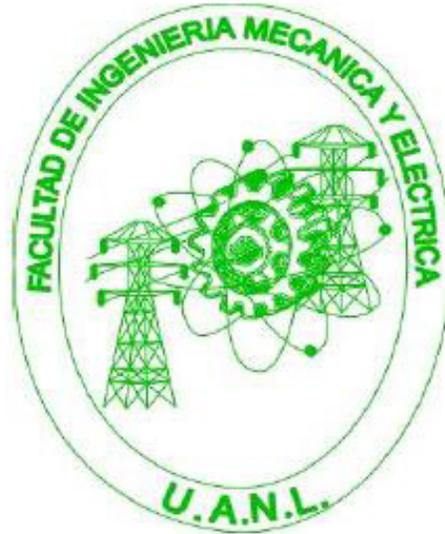
**POR**

**LUIS ALBERTO STANZIOLA MENESES**

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRÍA EN  
CIENCIAS DE LA INGENIERÍA AUTOMOTRIZ**

**JULIO 2016**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA  
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**



**“OPTIMIZACIÓN DEL DESGASTE DE LA HERRAMIENTA EN UNA  
TALLADORA DE ENGRANAJES CNC UTILIZANDO EL MÉTODO  
TAGUCHI Y ANÁLISIS DE LA VARIANZA (ANOVA)”**

**POR**

**LUIS ALBERTO STANZIOLA MENESES**

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA AUTOMOTRIZ**

**JULIO 2016**

**UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEÓN**

**FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA**

**SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**

Los miembros del Comité de Tesis recomendamos que la Tesis **“Optimización del Desgaste de la Herramienta en una Talladora de Engranajes CNC utilizando el Método Taguchi y Análisis de la Varianza (ANOVA)”** realizada por el alumno Luis Alberto Stanziola Meneses, con número de matrícula 1757838, sea aceptada para su defensa como opción al grado de Maestría en Ciencias de la Ingeniería Automotriz con Especialidad en Diseño e Innovación Automotriz.

El Comité de Tesis

---

Dra. Adriana Salas Zamarripa

Asesor

---

Dra. Tania Paloma Berber Solano

Revisor

---

M.C. David Guerrero

Revisor

Vo. Bo.

---

Dr. Simón Martínez Martínez

Subdirección de Estudios de Posgrado

San Nicolás de los Garza, Nuevo León, Junio del 2016

# AGRADECIMIENTOS

En primer lugar agradezco a la Dra. Tania Berber, por su orientación y apoyo brindado durante los 2 años de la maestría.

Agradezco a mi asesora académica, la Dra. Adriana Salas por todos los consejos brindados, por creer en mí y ayudarme a superar los obstáculos del proyecto de tesis.

Estoy muy agradecido con mi asesor industrial, el Ing. Samuel Kerber, por ser el principal guía del desarrollo experimental de mi proyecto de tesis. Por todo su apoyo y enseñanzas dentro de la empresa. Por su gran paciencia y horas dedicadas.

A mi compañero y gran amigo, Cecilio Cannavacciuolo, que con su amplio conocimiento en manufactura, me brindó consejos y asesoría durante la realización de esta tesis.

A todos los que en SISAMEX me ayudaron a desarrollar este proyecto. En especial los chicos del área de maquinados a Francisco, Alfredo, Israel y Julio. Al Ing. Lucio, el Ing. Alejandro y el Ing. Ángel de DAIMLER por toda la paciencia que me tuvieron.

Y por último y no menos importante, al CONACYT ya que sin su apoyo no hubiera sido posible la realización de este proyecto.

***¡Muchas gracias por todo!***

# DEDICATORIA

A Dios, ya que gracias a él he logrado tener las fuerzas y la sabiduría para concluir a tiempo el programa de maestría.

A mis grandes y luchadores Padres, Luis A. Stanziola S. y Briceida de Stanziola M., por permitirme llegar hasta donde estoy, por brindarme su apoyo incondicional. Por inculcarme buenos valores y enseñarme que luchando se ganan las batallas. No importa cuántas veces caigamos lo importante es levantarnos. Los quiero mucho Padres míos.

A mí amada y querida esposa, Stefanie Madriz, por ser mi fuente de motivación, inspiración y determinación. Por iluminar con alegría cada uno de mis días, por siempre estar a mi lado en los buenos y malos momentos. Gracias por tu apoyo y gran paciencia en la elaboración de esta tesis magistral. Porque detrás de un gran hombre, existe una gran mujer, muchas gracias mi Amor.

A mi hermano, Gustavo, por ser un ejemplo a seguir, por tu serenidad y fortaleza. Por enseñarme a tener paciencia, darme fuerzas y enseñarme a no quejarme por cosas sin importancia.

A mi familia, que a pesar de haber estado lejos, han estado en todo momento brindándome su amor y su apoyo

***Un fuerte y cálido abrazo...***

# TABLA DE CONTENIDO

TABLA DE CONTENIDO .....	iii
RESUMEN.....	vi
CAPITULO I.....	1
1.1    Descripción del problema .....	1
1.2    Objetivo.....	5
1.2.1    Objetivos específicos.....	5
1.3    Hipótesis.....	6
1.4    Metodología de trabajo .....	6
1.5    Estructura de tesis.....	7
CAPITULO II.....	9
2.1    Introducción.....	9
2.2    Inicios de la talladora de engranaje .....	10
2.3    Principio del proceso de conformado de engranajes .....	12
2.4    Principio básico de funcionamiento de una talladora de engranajes.....	13
2.5    Ventajas y limitaciones de la talladora de engranajes.....	17
2.6    El cortador de la talladora de engranajes .....	19
2.6.1    Tipos de dientes en el cortador .....	20
2.6.2    El re-afilado del cortador .....	21
2.6.3    Material de los cortadores.....	23
2.7    La talladora de engranajes CNC .....	24
CAPITULO III.....	27
3.1    Introducción.....	27
3.2    El desgaste progresivo de herramientas.....	28
3.2.1    Desgaste por cráter.....	29
3.2.2    Desgaste del flanco .....	30
3.3    Vida de las herramientas .....	31
3.4    Materiales de las herramientas .....	33
3.4.1    Aceros de alta velocidad .....	35

3.4.2	Aleaciones de fundición .....	36
3.4.3	Carburos cementados .....	36
3.4.4	Carburos recubiertos .....	36
3.4.5	Cerámicos y Cermets.....	37
3.4.6	Policristalinos .....	37
3.5	Recubrimientos de las herramientas .....	38
3.5.1	Tecnologías de recubrimiento de herramientas.....	41
3.6	Maquinabilidad .....	42
3.7	Fluidos de corte.....	42
3.8	Rugosidad superficial .....	45
3.8.1	Curvas de rugosidad superficial P y R .....	48
3.8.2	Definición de $R_a$ y $R_z$ .....	49
3.9	Estudios previos sobre análisis y predicción del desgaste de herramientas .....	51
<b>CAPITULO IV.....</b>		<b>57</b>
4.1	Introducción.....	57
4.2	Métodos de optimización .....	58
4.2.1	Método Taguchi y ANOVA .....	60
4.2.2	Método de respuesta de superficie (RSM) .....	61
4.2.3	Algoritmo genético.....	61
4.2.4	Redes neuronales artificiales .....	62
4.2.5	Sistema adaptativo neuro difuso .....	63
4.2.6	Método por elemento finito .....	64
4.3	El método Taguchi .....	64
4.3.1	Diseño de experimentos mediante el arreglo ortogonal.....	67
4.3.2	Factores que afectan la respuesta .....	69
4.3.3	Funciones objetivo en el método Taguchi .....	71
4.3.4	Análisis de datos del diseño de experimentos.....	73
4.4	Estudios previos sobre optimización del desgaste de herramientas y parámetros de corte utilizando el método Taguchi .....	76
<b>CAPITULO V.....</b>		<b>80</b>
5.1	Introducción.....	80
5.2	Equipos y materiales .....	80
5.2.1	Material de ensayo .....	81

5.2.2	Centro de maquinado .....	82
5.2.3	Herramienta de ensayo.....	83
5.2.4	Equipo de limpieza.....	85
5.2.5	Microscopio estereoscópico .....	86
5.2.6	Máquina de medición por coordenadas (MMC).....	86
5.2.7	Cronómetro.....	87
5.3	Identificación de factores de control y ruido.....	88
5.4	Ruta de procesos de obtención de muestras .....	90
5.4.1	Pre-experimentación .....	91
5.4.2	Proceso de maquinado .....	92
5.4.3	Post- experimentación.....	94
<b>CAPITULO VI.....</b>		<b>98</b>
6.1	Introducción.....	98
6.2	Medición del desgaste en el flanco.....	98
6.3	Medición de la rugosidad superficial $R_a$ y $R_z$ .....	104
6.4	Medición del tiempo de maquinado.....	105
6.5	Medición de la geometría de la pieza.....	107
6.6	Análisis de resultados por el método Taguchi y ANOVA .....	109
6.6.1	Variables óptimas para el mínimo desgaste de la herramienta .....	110
6.6.2	Variables óptimas para la mínima rugosidad superficial $R_a$ .....	114
6.6.3	Variables óptimas para la mínima rugosidad superficial $R_z$ .....	118
6.6.4	Variables óptimas para minimizar el tiempo de maquinado.....	122
6.6.5	Variables óptimas para obtener la geometría dentro de las especificaciones permisibles.....	126
6.7	Discusión del análisis por el método Taguchi y ANOVA .....	130
<b>CAPITULO VII.....</b>		<b>139</b>
7.1	Conclusiones .....	139
7.2	Recomendaciones.....	141
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....</b>		<b>143</b>
<b>LISTADO DE FIGURAS.....</b>		<b>148</b>
<b>LISTADO DE TABLAS.....</b>		<b>152</b>

# RESUMEN

Los estándares de hoy en día exigen que los procesos de maquinado sean cada vez más precisos y de mejor calidad. Variables como el desgaste de la herramienta, la rugosidad superficial y el tiempo de maquinado, son cada vez más estudiados, con la finalidad de obtener procesos más robustos, confiables y económicamente viables.

El objetivo de esta investigación, es optimizar, predecir y modelar matemáticamente el comportamiento que tienen los parámetros de funcionamiento de una talladora de engranajes CNC sobre el desgaste de la herramienta, la rugosidad superficial, el tiempo de maquinado y la geometría final del producto. Los parámetros de corte utilizados en este estudio fueron la velocidad de corte, el avance radial inicial, el avance radial final y la velocidad de generación.

La metodología utilizada para el análisis fue el método Taguchi y el análisis de la varianza, ambas herramientas estadísticas, comúnmente utilizadas para la optimización de procesos y productos. La medición del desgaste de la herramienta se hizo por medio de un microscopio estéreo, utilizando la técnica conocida como estereoscopía. Mientras, la geometría final y las rugosidades superficiales se obtuvieron mediante un sistema de medición por coordenadas.

Los resultados obtenidos fueron satisfactorios, se logró establecer por medio de una regresión lineal las ecuaciones matemáticas que predicen el comportamiento de las variables de salida, con una buena aproximación. A su vez, se logró determinar el porcentaje de contribución que tiene cada parámetro de funcionamiento sobre el desgaste de la herramienta, la rugosidad superficial, el tiempo de maquinado y la geometría final de la pieza. También, se obtuvieron los parámetros óptimos de funcionamiento para disminuir el efecto de cada una de las respuestas.

El método Taguchi y el análisis de la varianza proveen una metodología eficiente para la optimización de parámetros de corte, con menos efectos de los que serían necesarios con otros métodos de optimización. Esta metodología también disminuye el número de pruebas experimentales, por lo tanto, existe una reducción de costos y de tiempo en cualquier proyecto.

La experimentación fue realizada bajo condiciones específicas de velocidades de corte, avances radiales y velocidades de generación, y aunque los resultados arrojados en el desarrollo de las mediciones proporcionan una visión general del comportamiento del desgaste de herramienta, la rugosidad superficial, el tiempo de maquinado y la geometría del engranaje, esto no significa que siempre se presente el mismo comportamiento. Para esto se sugiere la realización posterior de experimentos, en los que se varíen más parámetros involucrados, como el tipo de herramienta, de maquinado, y lubricante. Para una optimización completa de todo el proceso se aconseja utilizar algunas de las técnicas de optimización multi-objetivo utilizadas en la actualidad, como los algoritmos genéticos o las redes neuronales.

# **CAPITULO I**

## **INTRODUCCIÓN**

### **1.1 Descripción del problema**

Con salarios en las plantas automotrices que son más de cuatro veces menores que los de Estados Unidos, México ha recibido en los últimos cuatro años inversiones por 13,365 mdd para nuevas plantas o para ampliar las existentes de armadoras japonesas, europeas e incluso estadounidenses, cuyo fin es abastecer desde aquí a las agencias de autos estadounidenses (Ramirez Tamayo, 2015). Las proyecciones indican que para el año 2020 se fabricarán 5.1 millones de unidades anuales (Industria automotriz hacia el 2020, 2016), el doble de lo producido en 2010. Para ese año, México habrá superado a Corea del Sur y Brasil y habrá saltado del octavo al sexto lugar entre los mayores fabricantes del mundo. Como sucede en la actualidad, tres cuartas partes o más de los vehículos ensamblados en México tendrán como destino final EU. En autopartes, México es quinto en el mundo; después de China, Estados Unidos y otros, pero por encima de Corea y Brasil. Se espera que para el año 2020 repunte a un lugar más alto por un incremento en la producción. En la tabla 1.1 se observa el porcentaje de industrias proveedoras del sector automotriz según rubro en México.

Sistemas Automotrices de México (conocida como SISAMEX por sus siglas en español) es una coinversión 50-50% de Quimmco y Meritor, Inc. La

empresa es un fabricante de clase mundial de componentes automotrices para vehículos comerciales. SISAMEX fabrica ejes, frenos, componentes relacionados y ensambles para camiones y tracto camiones (Clase 5 a 8), así como productos fuera de carretera para la industria agrícola. La planta de producción se localiza en Escobedo, Nuevo León. La compañía provee sus productos a clientes como John Deere, CNH, Magna, Axle Alliance y a través de Meritor a importantes fabricantes de equipo original, tales como International, Freightliner, Kenworth, Mercedes Benz, entre otros. Así mismo, la compañía es un proveedor de componentes para Meritor y sus clientes a nivel global.

Tabla 1.1 – Industria proveedoras del sector automotriz (Ramirez Tamayo, 2015).

<b>INDUSTRIAS PROVEEDORAS DEL SECTOR AUTOMOTRIZ (EN %)</b>				
<b>INDUSTRIAS MANUFACTURERAS</b>	<b>Fabricación de automóviles y camiones</b>	<b>Fabricación de carrocería y remolques</b>	<b>Fabricación de partes para vehículos automotores</b>	<b>Total industria automotriz</b>
Fabricación de telas	0.01	0.10	20.80	20.91
Curtido y acabado de cuero y piel	0.00	0.02	38.27	38.30
Fabricación de otros productos de cuero, piel y materiales sucedáneos	1.67	0.50	34.47	36.64
Fabricación de productos plásticos	12.50	0.08	9.51	22.10
Fabricación de productos de hule	31.51	0.63	6.91	39.05
Industria básica del aluminio	0.42	1.60	23.00	25.03
Modelo por fundición de piezas metálicas	0.01	0.02	32.76	32.79
Fabricación de productos metálicos forjados y troquelados	0.02	0.05	33.74	33.81
Fabricación de herramientas de mano sin motor y utensilios de cocina metálicos	0.08	0.04	20.84	20.96
Maquinado de piezas metálicas y fabricación de tornillos	7.39	0.29	16.30	23.99
Recubrimientos y terminados metálicos	11.73	0.63	22.59	34.96
Fabricación de maquinaria y equipo para la industria manufacturera, excepto la materia que procede de la industria metalmeccánica	29.86	1.96	5.05	36.87
Fabricación de maquinaria y equipo para la industria metalmeccánica	22.43	0.66	17.36	40.45
Fabricación de motores de combustión interna, turbinas y transmisiones	18.53	0.11	8.20	26.84
Fabricación de otro tipo de transporte	18.66	0.03	13.28	31.97

FUENTE: Banco BASE con datos de INEGI

Actualmente en la empresa SISAMEX se encuentra la división DAIMLER, que es la encargada de fabricar los ejes de transmisión para los vehículos industriales de la marca Mercedes Benz, entre las máquinas herramienta que se encuentran en la planta está la talladora de engranajes por control numérico

computarizado (CNC), marca Gleason Pfauter, modelo P 200 S. Esta máquina actualmente tiene un proceso estable, sin embargo se busca expandir el conocimiento a través de metodologías científicas que logren maximizar su eficiencia y operación, así como minimizar los daños e incrementar la producción de la maquinaria.

El departamento de tecnologías de manufactura avanzada anticipándose a una posible demanda de producción futura por parte del cliente, ha puesto en marcha un plan para optimizar el proceso de elaboración de engranajes en la talladora de engranajes CNC P 200 S mediante una metodología científica que permita minimizar el desgaste de la herramienta de corte al mínimo, manteniendo la calidad final de producto.

En la actualidad, la forma en que se optimizan los parámetros del proceso de la máquina para aumentar la producción es de manera empírica, sin una base científica y más que todo mediante la valiosa experiencia del ingeniero. La desventaja de adoptar esta metodología es que se consigue aumentar la producción pero con consecuencias para otros parámetros y componentes de la máquina, en este caso el desgaste prematuro de la herramienta, lo que a su vez incurre en un aumento del costo de producción, ya que se tiene que cambiar la herramienta de corte en intervalos de tiempo más frecuentes.

La optimización de procesos en la industria de manufactura ha sido un tema muy estudiado por muchos investigadores. Se han desarrollado muchas técnicas de optimización a lo largo de los años, que se podrían clasificar en dos grupos: técnicas convencionales y técnicas modernas de optimización. Las técnicas modernas de optimización han ido mejorando con el desarrollo de mejores equipos computacionales y la investigación de nuevas tecnologías de información como lo es la inteligencia artificial y el desarrollo de nuevos algoritmos basados en la evolución natural. La estadística también ha tenido un papel muy importante en el desarrollo de nuevas formas de optimización de procesos. Este estudio estará basado en la utilización de un método estadístico

desarrollado por el Dr. Genichi Taguchi, un ingeniero japonés que dedicó gran parte de su vida a la optimización de diseño de productos y procesos.

El método Taguchi permite obtener un proceso más robusto mediante la utilización del diseño ortogonal, la función de pérdida diseñada por el Dr. Taguchi y el análisis de la varianza. El diseño ortogonal permite reducir la cantidad de experimentos a realizar, con la misma confiabilidad y precisión de resultados que el método factorial completo. La función de pérdida de Taguchi se utiliza para obtener los parámetros óptimos de un proceso. Mientras que el análisis de la varianza nos indica la influencia que tienen los parámetros sobre una calidad característica del proceso, se podrá encontrar más información de este tema en el capítulo IV de esta investigación.

Como se mencionó anteriormente, el proceso de la talladora de engranajes CNC en planta es un proceso estable, pero con miras a aumentar la capacidad de la planta, se busca una alternativa para aumentar la cantidad de piezas maquinadas, sin caer en la necesidad de la compra inmediata de otro similar.

En estos momentos para compensar la capacidad de demanda, el equipo debe trabajar 24 horas los 7 días de la semana, esto supone que el personal a cargo del equipo debe laborar en el mismo periodo de tiempo, aumentando el estrés y reduciendo la calidad de vida de los operadores.

Los cortadores utilizados deben ser enviados a re-afilar con cierta frecuencia de tiempo, cada vez que un cortador debe ser cambiado del equipo se requiere de una hora de trabajo en la que la máquina debe ser detenida para realizar dicho cambio, esto es igual a tiempo desperdiciado y dinero en re-afilado.

Optimizar el desgaste de las herramientas de corte de la talladora de engranajes CNC supondrá un aumento en la producción, más robusticidad del proceso, ahorro de los costos de producción, menos cantidad de horas en detención del equipo, reducción de las jornadas de trabajo del personal a cargo del equipo, que a su vez se traduce en mejor calidad de vida de los operadores.

El alcance de este estudio pretende obtener los parámetros óptimos de corte en una talladora de engranajes CNC basados en el desgaste de la herramienta, el tiempo de maquinado, la rugosidad superficial y la geometría final de la pieza, mediante el Método Taguchi y el análisis de la Varianza, que den como resultado a un posible aumento de la producción y una disminución de los costos de operación.

## **1.2 Objetivo**

Optimizar el desgaste de la herramienta en una talladora de engranajes CNC en el maquinado de un acero DIN 25MoCr4 utilizando el Método Taguchi, Análisis de la Varianza (ANOVA).

### **1.2.1 Objetivos específicos**

- Minimizar el tiempo de maquinado, cuidando que la geometría del producto se encuentre bajo los parámetros permisibles.
- Determinar una correlación entre el desgaste de la herramienta y la calidad del producto.
- Definir los parámetros de control para el proceso con el fin de que se puedan utilizar en otros procesos de corte en la planta.
- Caracterizar los parámetros de control en el proceso de tallado de engranajes, que inciden directamente en el desgaste de la herramienta y otras variables de salida.
- Disminuir los costos de producción, aumentar la cantidad de piezas producidas y minimizar el cambio de cortadores para re-afilado.
- Establecer una metodología científica capaz de ajustarse a las necesidades del proceso.

### **1.3 Hipótesis**

Obteniendo los parámetros óptimos de corte mediante el método Taguchi y el análisis de la varianza, tomando en cuenta todas las variables críticas del proceso, se logrará minimizar el desgaste de la herramienta, minimizar la rugosidad superficial, minimizar el tiempo de maquinado y mantener la geometría de la pieza en los valores permisibles, de esta manera se podría aumentar la producción en un 20% de la situación actual.

### **1.4 Metodología de trabajo**

Este estudio se divide en tres etapas de planeación, este método se utiliza ya que le da un sentido de organización al mismo. Las etapas del proyecto comprenden la preparación, experimentación, y análisis y resultados.

La etapa de preparación del proyecto comprende la fase donde se definió el problema, los objetivos y la metodología utilizada. Se realizó una exhaustiva revisión bibliográfica con la intención de conocer estudios previos relacionados con el tema. Una vez, que se definieron los puntos anteriores se propuso el método con el cual se realizó la investigación. Se estableció el universo, las muestras, el instrumental y las técnicas de recolección de datos. Se confeccionó el cronograma de actividades y se definieron fechas límites.

En la etapa de experimentación se definieron los días en que se realizaron las pruebas y la recolección de datos necesarios para poder estudiar el fenómeno en cuestión.

Una vez completado el ciclo de experimentación se procedió con la etapa de análisis y resultados, donde se evaluaron e interpretaron todos los datos recolectados, para llegar a una posible solución. Luego se exponen las conclusiones del estudio. En la figura 1.2 se muestra la estructura general de esta tesis magistral.

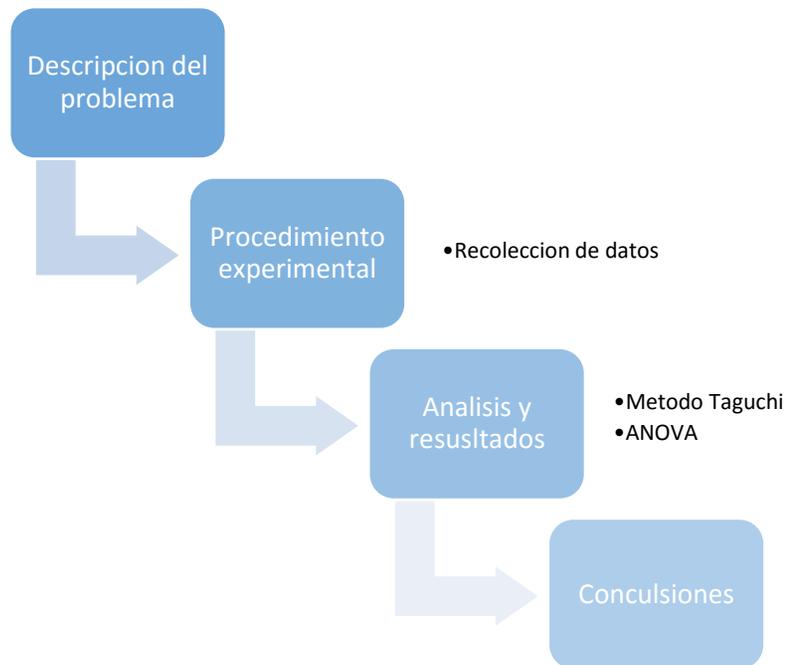


Figura 1.2 – Estructura general de la tesis magistral.

## 1.5 Estructura de tesis

Con el fin de comprender mejor este estudio, es necesario entender el funcionamiento de la talladora de engranajes. El capítulo II muestra un breve resumen del desarrollo de la talladora de engranaje a finales del siglo XIX. Una descripción clara de los componentes más importantes de la máquina y el principio básico de funcionamiento. Se describe la cinemática de la talladora, los tipos de cortadores y las ventajas de una talladora de engranajes convencional versus una talladora de engranajes por control numérico computarizado.

El capítulo III describe la vida útil de las herramientas, los materiales de los que están hechas y las últimas tecnologías de recubrimiento para evitar el desgaste excesivo. El capítulo continúa con los tipos de desgastes que existen y que variables los producen. Se hace una breve descripción de estudios previos relacionados al desgaste de herramientas y como minimizarlos.

El objetivo de este estudio es la optimización de los parámetros del proceso para minimizar el desgaste de la herramienta, es por esto que el capítulo IV describe el uso de técnicas de optimización convencionales y las últimas técnicas de optimización que se han desarrollado. Se hace una amplia descripción sobre el método Taguchi y el ANOVA. Este capítulo también discute el trabajo hecho por otros investigadores, asociados a la optimización de parámetros de corte y la disminución del desgaste de herramientas mediante el método Taguchi y ANOVA.

En el capítulo V se describen los materiales y la metodología utilizada en esta investigación, incluyendo los detalles de la experimentación por medio del arreglo ortogonal y la descripción de las mediciones realizadas

En el capítulo VI se analizan y discuten los resultados obtenidos mediante la utilización del método Taguchi y el análisis de la varianza. Se hace la presentación de los parámetros óptimos del proceso.

Finalmente el capítulo VII presenta las conclusiones del trabajo de investigación y sugiere trabajos futuros para otros investigadores.

# **CAPITULO II**

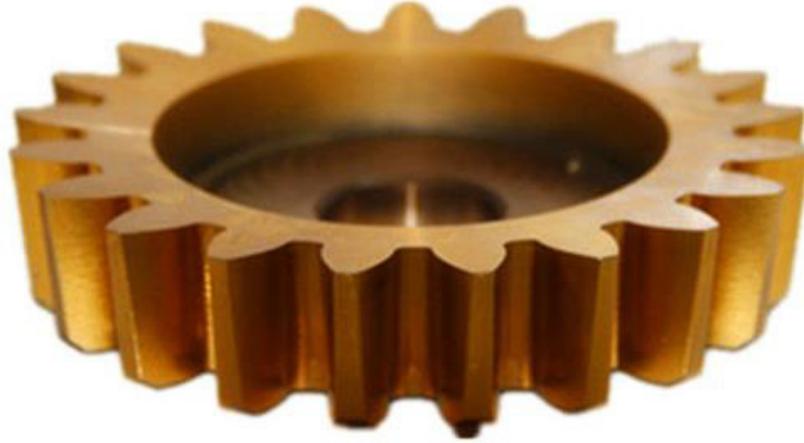
## **EI PROCESO DE TALLADO DE ENGRANAJES**

### **2.1 Introducción**

La conformación de engranajes es un proceso de generación donde se producen engranajes a partir de máquinas herramientas. La máquina herramienta, en este caso, la talladora de engranajes, genera el engranaje a partir de una pieza en blanco, mediante un cortador similar a un engranaje, excepto que al final del flanco tiene un ángulo pronunciado esto con el fin de proveer mayor acción de corte como se muestra en la figura 2.1. La herramienta de corte y la pieza en blanco giran simultáneamente, a su vez la herramienta de corte realiza varios pases sucesivos a través de la pieza en blanco, generando una serie de cortes espaciados individuales. Cuando el cortador alcanza la profundidad deseada se puede decir que ha alcanzado el perfil del engranaje deseado.

La talladora de engranajes es un medio versátil y preciso de fabricación de engranajes rectos, engranajes helicoidales, engranajes de espina de pescado, engranajes internos y engranajes de cara, facilitan el trabajo donde otros procesos de corte de engranajes no pueden por la complejidad de la posición al

cortar como por ejemplo: el corte de engranajes internos (Wen-Yao, Chung-Biau, & Yi-Cheng, 2000).



*Figura 2.1 – Cortador de una talladora de engranajes.*

## **2.2 Inicios de la talladora de engranaje**

Muchos de los artículos producidos en masa requieren engranajes y mucho más importante, la nueva maquinaria de manufactura también depende de la habilidad de transferir movimiento y hacer cambios de velocidad entre sistemas de transmisión de una manera precisa y sin vibraciones. Los engranajes de hierro fundido utilizados extensivamente en las primeras máquinas y continuando en la industria textil, ya no eran satisfactorios para el uso en maquinaria de alta velocidad utilizadas por las nuevas tecnologías. La transición entre la fabricación de relojes y producción de engranajes ocurrió en la máquina de James Fox en 1833, donde utilizó cortadores en forma de dientes y micrómetros para maquinar un engranaje grande de una pieza en blanco en un husillo vertical. John George Bodmer patentó una máquina para fabricar engranajes en 1839, la cual era de realizar cortes para engranajes internos, rectos y biselados en adición a los engranajes externos, pero sus herramientas de corte eran extremadamente difíciles de afilar. Los cortadores de engranajes

Whitworth en 1834 fueron las primeras máquinas con cortadores involutos dirigidos por una faja y una rueda. Otras máquinas de conformado de engranajes fueron desarrolladas para la fabricación de engranajes utilizados en motores y transmisiones de potencia como la Gleason, que permitía el corte de engranajes rectos y biselados de gran tamaño. La descripción del método para producir el perfil de un diente fue aplicada por primera vez por Herman en 1877 y utilizaba una herramienta de movimiento recíprocante en un solo punto, similar al de la talladora de engranajes actual. Smith y Coventry de Inglaterra exhibieron en la Expo de Paris en 1900, una máquina con dos cortadores para trabajar en los lados opuesto de un mismo diente, esta máquina aún se muestra en Museo de Ciencia de Londres. La talladora de engranajes inventada por E.R. Fellows en 1897 es la más significativa y ampliamente utilizada. Esta emplea el principio generador de moldeo, con un engranaje total como generador, endurecido y con los bordes de corte retrocedidos. Esta máquina trabajaba como una talladora vertical, con la herramienta de corte y la pieza en blanco rotando en mallas (Mcneil, 2002, pág. 411).

Hasta aproximadamente 1968, las talladoras de engranajes habían cambiado muy poco desde su concepción en los inicios de 1900. Eran máquinas con cabezales de cortador tipo puente, con un sistema de alivio en la mesa para alejar el cortador de la pieza en la carrera de retorno, era una pasada del cortador no productiva (Lange J. M., 1985), como se muestra en la figura 2.2.

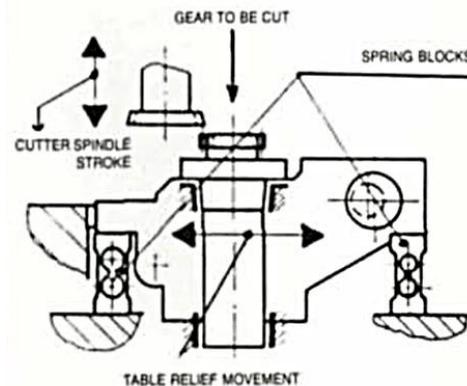


Figura 2.2 – Talladora de engranaje “vieja escuela” – Sistema de retroceso en la mesa de trabajo (Lange J. M., 1985).

Las talladoras de engranajes modernas fueron introducidas en 1969, y con ellas el sistema de alivio de la mesa fue eliminado y trasladado al husillo, el husillo a su vez fue montado en una columna más robusta, como se muestra en la figura 2.3 (Lange J. M., 1985). Desde aquel entonces, las talladoras de engranajes han cambiado muy poco y han sido desplazadas gradualmente por otros sistemas de conformado de engranajes como el tallado de engranajes por fresa madre.

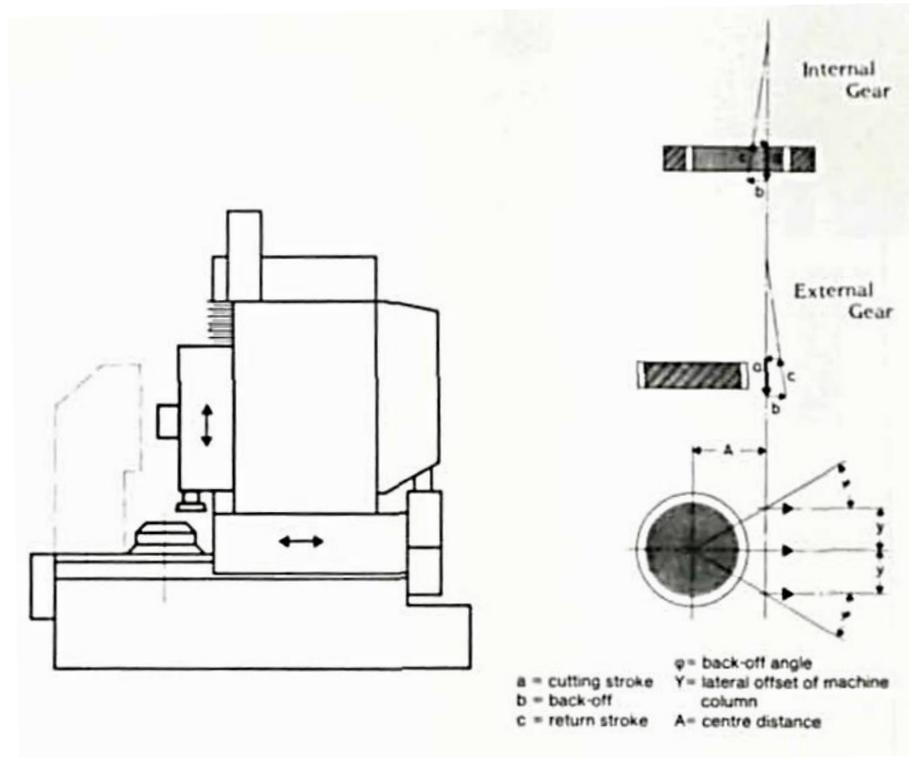


Figura 2.3 – Talladora de engranajes moderna – Sistema de retroceso en el husillo (Lange J. M., 1985).

## 2.3 Principio del proceso de conformado de engranajes

El proceso de conformado de engranajes es un proceso generativo. El cortador es virtualmente un engranaje provisto de bordes afilados. La herramienta rota a una tasa de velocidad relativa con respecto a la pieza y cualquier espacio del diente de la pieza es formado por un diente completo del cortador. Consecuentemente, cualquier error en el diente del cortador es reproducido directamente sobre el espacio del diente en la pieza. Como el cortador rota con

la pieza, este forma el espacio del diente con pequeños incrementos de corte dependiendo de la relación de avance utilizados, entonces el diente en la pieza es formado por una serie de cortes individuales y la involuta en el engranaje, es en efecto, una serie de finos cortes espaciados como se puede apreciar en la figura 2.4. La profundidad de estos cortes son, sin embargo, extremadamente pequeños, aun para las relaciones de avance alto y para todo los fines prácticos, la involuta puede considerarse como una curva suave (Bangalore, 2008, pág. 349).

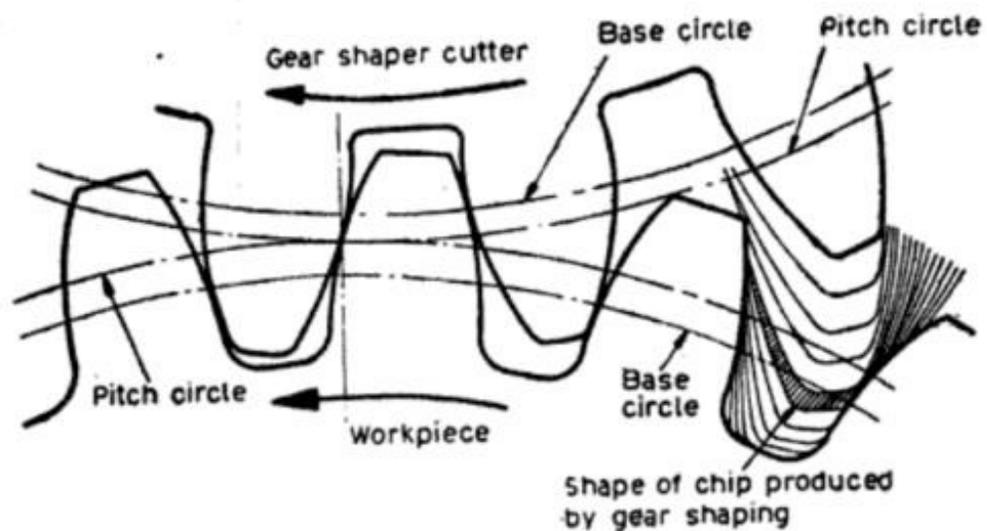


Figura 2.4 – Acción generadora de un cortador de talladora (Bangalore, 2008).

## 2.4 Principio básico de funcionamiento de una talladora de engranajes

Existe una gran variedad de modelos de talladoras de engranajes, con rangos de trabajo donde se pueden producir engranajes con tamaños desde 1/16" de diámetro y tan fino como 200 de paso diametral, hasta engranajes de 2 metros y un paso diametral de 1. La mayoría de las talladoras de engranajes tienen una configuración de husillo vertical pero no necesariamente es la regla, estas pueden trabajar de igual manera con una configuración de husillo horizontal.

Esencialmente, el cortador de tipo piñón es un engranaje con bordes afilados de corte. Para proveer la acción de corte, el cortador tiene un movimiento lineal recíproco de alta velocidad sobre su propio eje, y a la vez, un movimiento de avance que puede ser en el cortador, en la pieza o en ambos componentes, presentado así diferentes partes de los flancos del cortador en el engranaje para formar el perfil de la curva involuta, ver figura 2.5.

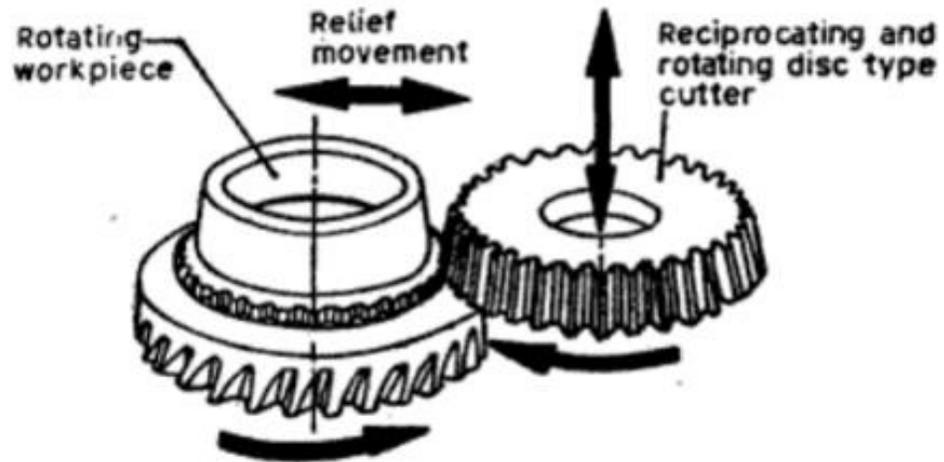


Figura 2.5 – Principio de trabajo de una talladora al realizar un engranaje recto (Bangalore, 2008).

El movimiento de avance es interpretado como el avance por carrera alrededor de la circunferencia del círculo de paso del cortador. Así, en una revolución del cortador, da como resultado  $f$  carreras dadas por la ecuación:

$$f = \frac{\text{diametro de paso}}{\text{avance por carrera}} \times \pi \quad (2.1)$$

Este valor a menudo es conocido como avance rotacional ' $f$ ', carrera por revolución del cortador (Bangalore, 2008, pág. 350).

El movimiento recíproco lineal, a través del eje del cortador, se realiza generalmente por un tipo de arreglo manivela-palanca o por movimiento

hidráulico (mayormente utilizado en el presente). La velocidad del movimiento de la carrera puede ser regulada por medio de válvulas de control en el sistema hidráulico, y por medio de poleas y cajas de transmisión en el arreglo de tipo manivela-palanca (Rakshit, 1989). En la figura 2.6 se puede observar una talladora de engranajes con movimiento del husillo mediante el uso del arreglo manivela-palanca. Esta configuración se utilizó más que todo en las talladoras de engranajes fabricadas hasta antes de los años 70.

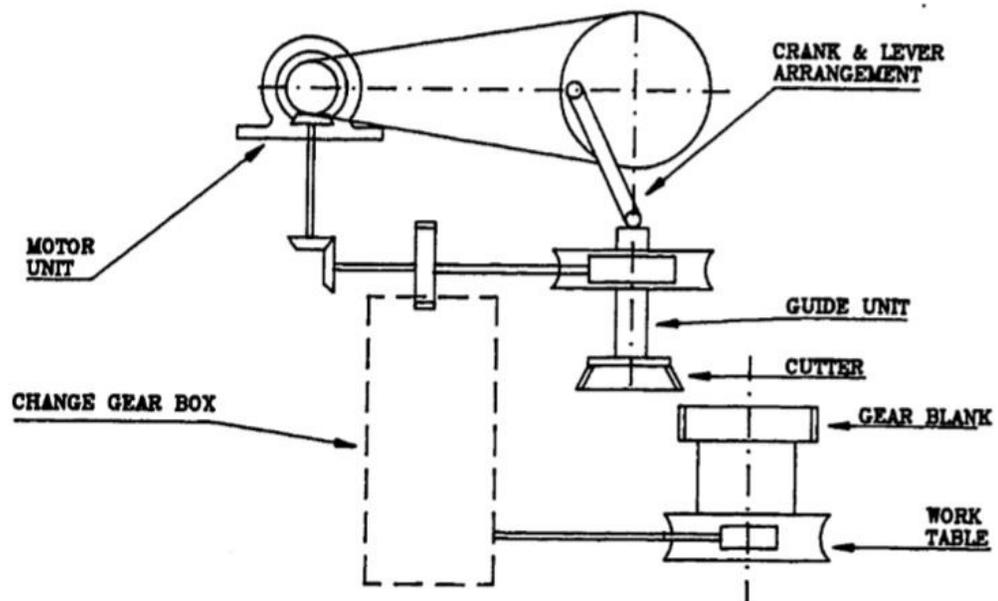
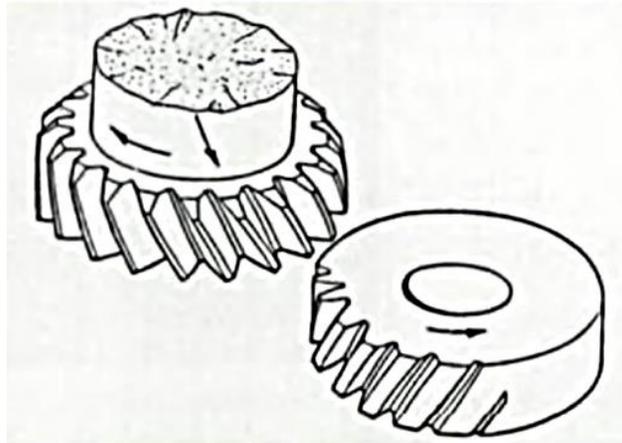


Figura 2.6 – Proceso de tallado de engranajes en maquina convencional (Rakshit, 1989).

El camino seguido por el cortador es definido por una guía fijada al final del husillo del cortador. Esta guía puede ser cambiada dependiendo del tipo de engranaje a realizar, ya sea recto o helicoidal. Es por este aspecto que la talladora de engranajes no es tan versátil como el proceso de tallado de engranaje por fresa madre, ya que para cada ángulo de helicoides, se debe diseñar y fabricar una guía para el husillo.

Cuando se conforma un engranaje helicoidal, un movimiento espiral es introducido al cortador por la guía helicoidal, ver figura 2.7. Durante la carrera de

retorno (carrera de alivio) el cortador es alejado de la pieza para prevenir el contacto con el flanco del cortador y evitar que la pieza tenga un movimiento hacia atrás (Lange J. , 1994).



*Figura 2.7 – Principio de trabajo de una talladora al realizar un engranaje helicoidal (Lange J. , 1994).*

Como la herramienta no puede retroceder mientras trabaja en la posición de corte, el movimiento de alivio puede ser realizado tanto por el husillo del cortador o por la mesa de trabajo donde va sujeta la pieza. A pesar de que el resultado de colocar el alivio en alguno de los dos lugares es el mismo, opiniones diferentes difieren sobre cuál es el mejor método. La observación general es que colocar el movimiento de alivio en el husillo tiene la ventaja de que el peso del mecanismo es constante, de esta manera la masa y la inercia son conocidas para el diseño (Bangalore, 2008).

Hacer el retorno sin el movimiento de alivio del cortador con la pieza puede provocar que se destruya el borde de corte y afectar la vida de la herramienta, es por esto que el husillo del cortador debe ser aliviado alejándolo de la pieza a través de la carrera de no corte, ver figura 2.8 (Rakshit, 1989).

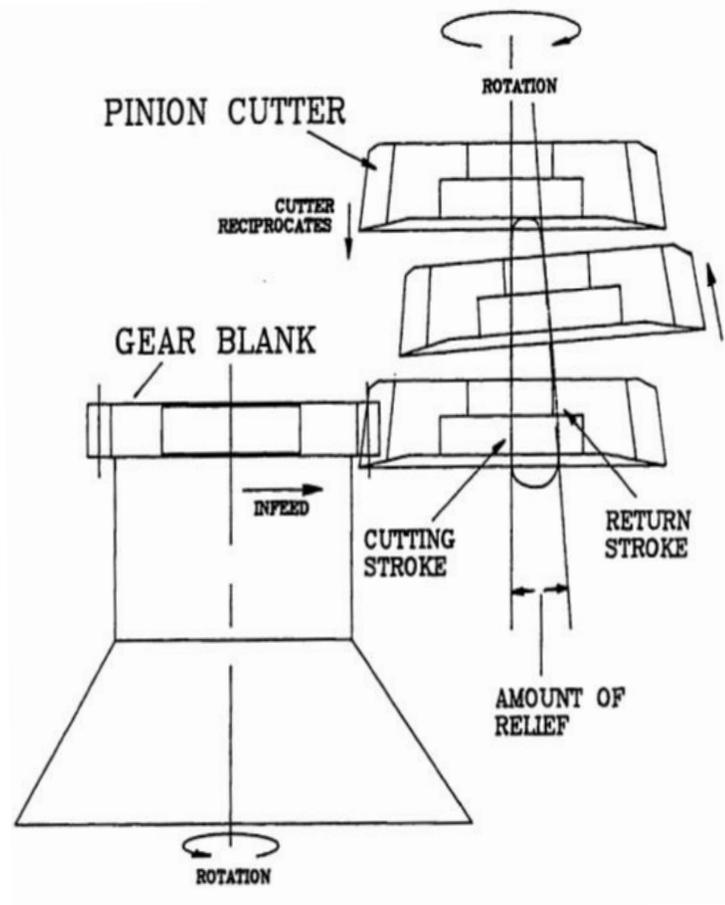


Figura 2.8 – Movimiento de alivio en el cortador (Rakshit, 1989).

## 2.5 Ventajas y limitaciones de la talladora de engranajes

Hay cierto tipo de componentes que solo pueden ser producidos en una talladora de engranajes y existen otros que aunque se puedan producir en la talladora de engranaje por fresa madre, son mejores producirlos por el método del tallado (Rakshit, 1989).

Es la herramienta de conformación de engranajes más versátil que existe, debido a la amplia variedad de engranajes que pueden ser producidos, comúnmente, se utiliza para producir engranajes rectos y helicoidales, pero este proceso puede ser aplicado para engranajes tipo espina de pescado, estrellas de cadena, engranajes elípticos, engranajes de cara y cremalleras. Entre los tipos de componentes que solo se pueden realizar mediante la talladora de engranajes,

están los engranajes internos y los engranajes con hombros adyacentes, como se muestra en la figura 2.9.

Debido a que el costo de los cortadores es relativamente bajo comparado a otros procesos de corte, el tallado de engranajes es práctico para cualquier cantidad de volumen de producción (Youssef & El-Hofy, 2008, pág. 199). Otra gran ventaja de las talladoras de engranajes es que los cortadores siguen siendo muy precisos a altas velocidades, algo que es muy valioso a la hora de fabricar engranajes. Adicional, dejan un acabado superficial muy aceptable evitando así, en ciertos componentes su traslado a una herramienta de pulido por ejemplo: la rectificadora.

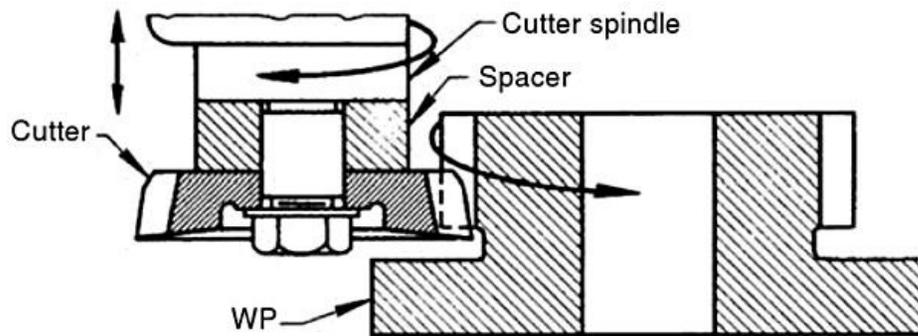


Figura 2.9– Tallado de engranaje en pieza con hombro adyacente (Youssef & El-Hofy, 2008).

Entre las limitaciones que tienen las talladoras de engranajes encontramos que los engranajes de tipo tornillo sin fin y tipo corona no pueden ser realizados.

Debido a que el movimiento de corte es solo en una dirección, solo se utiliza un tercio del tiempo de la máquina, esto las hace más ineficientes que una talladora de engranajes por fresa madre, ya que su movimiento de corte es constante (Yamamoto, 2016).

Otra limitación de la talladora de engranajes es la distancia de corte, que depende la distancia de la caña del cortador. También, componentes que son una sola pieza junto con un eje son difíciles de montar en la máquina (Rakshit, 1989).

La necesidad de diseñar y fabricar una guía para poder producir diferentes ángulos de engranajes helicoidales, es también una gran desventaja con respecto a otros procesos de conformado de engranajes.

## 2.6 El cortador de la talladora de engranajes

Existen varios tipos de cortadores para las talladoras de engranajes, estos a su vez dependen directamente del tipo de engranaje que se va a producir, hay que ser muy cuidadoso a la hora de escoger la clase de cortador para un trabajo determinado y tener muy clara la geometría final que se desea obtener.

Los tipos de cortadores mayormente utilizados son el de tipo disco, tipo buje y tipo caña. En la figura 2.10 se pueden observar los tipos de cortadores y sus geometrías. Los cortadores de tipo buje y disco son bastante parecidos, la diferencia está en la profundidad extra del avellanado, resultando en un incremento del espesor del formador. El cortador tipo buje es principalmente utilizado cuando la tuerca de sujeción no puede ser proyectada por debajo de la cara de corte del cortador por razones de interferencia con la pieza o la forma de sujeción de la pieza, figura 2.10c (Bangalore, 2008).

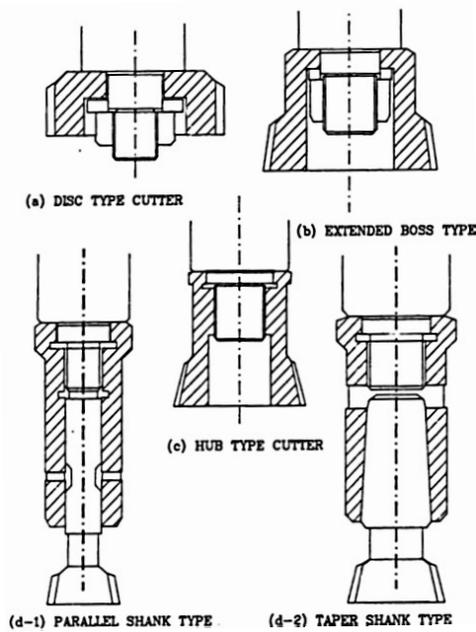


Figura 2.10 – Tipos más comunes de cortadores (Rakshit, 1989).

El cortador tipo caña llamado también cortador tipo disco pequeño, montado en un adaptador para el husillo, es generalmente utilizado para producir engranajes de diámetros pequeños. En la figura 2.11, se encuentra la nomenclatura de las partes de un cortador de una talladora de engranajes.

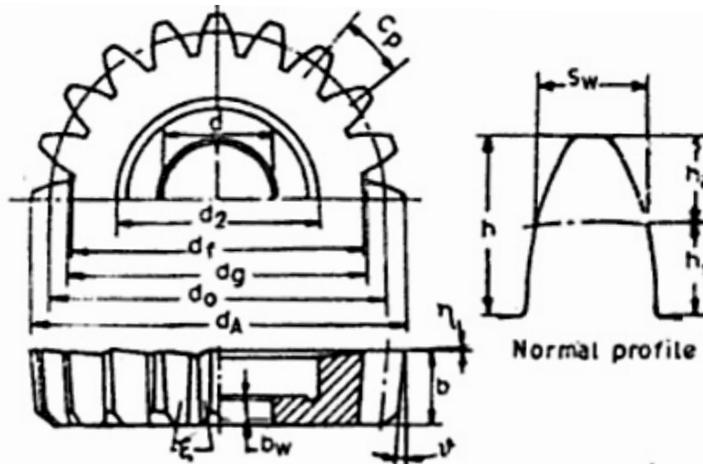


Figura 2.11 – Nomenclatura de las partes de un cortador –  $S_w$  = espesor del diente,  $h_a$  = addendum,  $h_f$  = dedendum,  $h$  = profundidad de diente,  $d$  = diámetro del centro,  $d_2$  = diámetro del avellanado,  $d_1$  = diámetro de la raíz,  $d_g$  = círculo base,  $d_o$  = diámetro del paso,  $d_A$  = diámetro exterior,  $c_p$  = paso circular,  $b$  = ancho de diente,  $b_w$  = espesor de malla,  $\eta$  = ángulo de la cara de corte,  $\nu$  = ángulo de la raíz,  $\xi$  = ángulo del flanco (Bangalore, 2008).

### 2.6.1 Tipos de dientes en el cortador

Es deseable, utilizar siempre que se pueda, cortadores con forma de curva involuta en los dientes, pero a veces las limitaciones y el diseño demanda hacer ciertas modificaciones. Las operaciones que necesitan un cepillado luego del maquinado, son cortadas usualmente con una profundidad de diente extra y con un suavizado en la raíz para posteriormente permitir acomodar la herramienta de cepillado. Esto quiere decir que el cortador tiene una distancia más larga de addendum y una protuberancia en la punta del diente para proveer la curva suavizada en la raíz de la pieza, ver figura 2.12a. Cuando se requiere de una modificación de la involuta en la punta del diente, se precisa un flanco cerca del fondo del diente del cortador. Existen dos tipos de flancos para este propósito: el

flanco recto, figura 2.12b y el tipo “H”, figura 2.12c. Para ambos casos es necesario tener prácticamente un radio completo o esquinas con radio en la raíz del engranaje a realizar. La modificación del radio en las puntas de los dientes del cortador, como se ve en la figura 2.12d y la figura 2.12e, es requerida para completar esta geometría. Para chaflanar las esquinas en las puntas del engranaje a realizar, se requiere un flanco con chaflan como se muestra en la figura 2.12f. Si se desea dejar la punta del engranaje plano, se debe dejar el diámetro de la raíz del cortador plano de igual forma, ver figura 2.12g (Cubberly & Bakerjian, 1989, págs. 28-21).

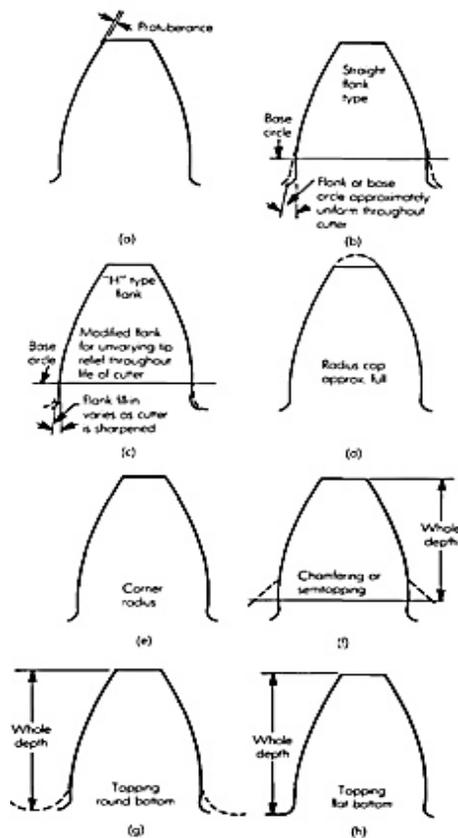


Figura 2.12 – Formas comunes de los dientes en los cortadores (Cubberly & Bakerjian, 1989).

## 2.6.2 El re-afilado del cortador

Después que un cortador nuevo ha sido utilizado por un número finito de veces, este pierde su filo y necesita ser re afilado para poder usarlo nuevamente.

El re-afilado de un cortador es una operación que requiere cuidado y atención si lo que se desea es mantener la precisión original a través del tiempo. Un cortador puede ser re-afilado múltiples veces, rectificando el ángulo de la cara de corte, hasta que llegue a sus dimensiones límite, como se muestra en la figura 2.13 (Bangalore, 2008).

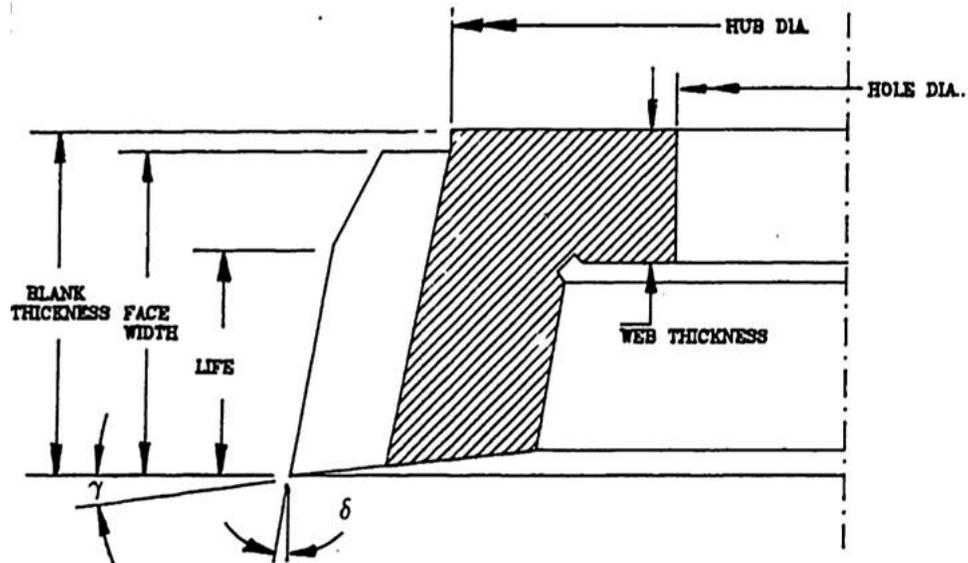


Figura 2.13 – Dimensiones importantes de un cortador (Rakshit, 1989).

El método más común para re-afilar un cortador es el rectificado utilizando una lima circular, donde su eje forme un ángulo  $\beta_{\omega}$  ( $=90 - \gamma_c$ ), donde  $\gamma_c$  es el ángulo de la cara de corte del cortador (Rakshit, 1989). El re-afilado se hace en un rectificado de dos pasos, el primero es el rectificado áspero o de desbaste, se utiliza una rueda lijadora de aproximadamente 300 a 350 mm de diámetro, 25 mm de alto y un grano 60. La rueda se opera sobre la superficie de la cara del cortador a una velocidad de 25 a 30 m/s. La rueda se pasa sobre la cara cerca de 45 carreras por minuto hasta quitar un espesor de 0.02 mm, se deben dejar como tolerancia de 0.05 a 0.1 mm para la pasada de acabado al re-afilado.

Para darle el acabado al re-afilado, se utilizan ruedas lijadoras especiales de grano fino, rueda blanda de 300 mm de diámetro y 12.5 mm de alto, operadas

a una velocidad de 25 a 30 m/s. Para las pasadas tanto de desbaste como de acabado, el cortador es colocado sobre una placa magnética que se encarga de la sujeción y lo hace rotar a una velocidad de 160 rpm, ver figura 2.14.

Normalmente, se mantiene el ángulo de la cara de corte en  $5^\circ$  cuando el cortador es diseñado. A medida que se va rectificando, si el ángulo de la cara de corte  $\gamma$  es incrementado, la eficiencia de corte también es incrementada pero el ángulo de presión será incorrecto. Si el ángulo de la cara de corte  $\gamma$  disminuye, la eficiencia de corte se reduce y el ángulo de presión también varía. Para asegurarse que el re-afilado mantenga un correcto ángulo de presión, el rectificado debe realizarse con el ángulo de la cara de corte especificado por el fabricante del cortador. Rectificar mucho metal a la vez puede causar fisuras por sobrecalentamiento en el cortador y esto debe ser evitado (Rakshit, 1989).

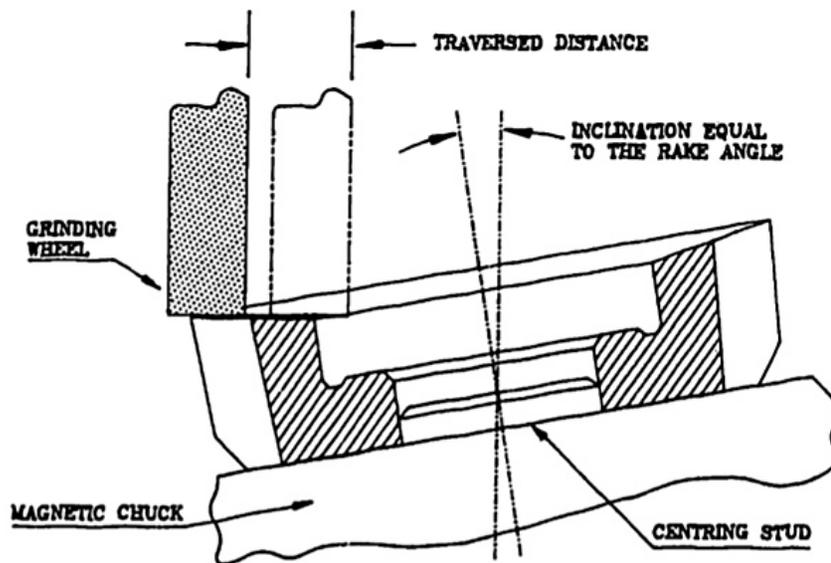


Figura 2.14 – Re-afilado de un cortador (Rakshit, 1989).

### 2.6.3 Material de los cortadores

Muchos de los cortadores están hechos de aceros de alta velocidad (HSS, por sus siglas en inglés) AISI M-2, M-3 y M-4. Los HSS son aceros que tienen buena resistencia a las altas temperaturas y al desgaste. También, se utilizan

recubrimientos en estas herramientas para aumentar la vida de la misma, uno de los recubrimientos más utilizados es el nitruro de aluminio y titanio (TiAlN) (Janninck, 1990). En el capítulo III se ampliará mucho más sobre este tema.

## **2.7 La talladora de engranajes CNC**

Con el tiempo y por las exigencias del mercado, la talladora de engranajes convencional perdió terreno frente a una nueva talladora de engranajes asistida mediante control numérico. Las ventajas que esta incorporación tecnológica tuvo son amplias, por ejemplo:

- **Facilidad de operación**

Al ser computarizada, se elimina por completo la manipulación en tiempo de los parámetros por parte de un operador. Se pueden hacer varios programas para producir distintas piezas, ya que estos son almacenados en la memoria de la máquina y ser utilizados cuando se requiera.

- **Gran precisión**

Al tener trenes cinemáticos más cortos el cortador y la pieza pueden estar mucho más cerca sin causar ningún tipo de daño, a su vez esto causa menor vibración, resultando en una mayor precisión.

- **Máxima repetitividad**

Una vez que los parámetros óptimos de funcionamiento son determinados, se pueden producir lotes grandes de piezas tantas veces sea necesario, sin comprometer la geometría de la pieza.

- **Ciclos de tiempo más cortos**

Al tener un programa numérico para controlar la pieza, el tiempo de preparación de la máquina para cada nueva pieza disminuye considerablemente. También, con el aditamento de brazos robóticos para

alimentar la máquina de nuevas piezas, se obtiene gran disminución del tiempo.

La talladora de engranajes CNC permite el control del movimiento en 8 a 11 ejes, dependiendo del modelo de máquina. En la figura 2.15 se observa una talladora de engranajes CNC y la cinemática que esta permite.

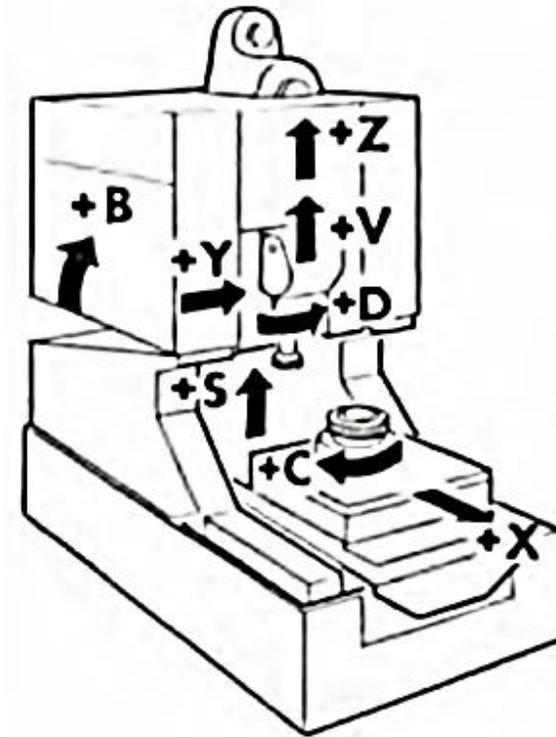


Figura 2.15 – Ejes de movimiento de una talladora de engranajes CNC (Sulzer, 1986).

Donde el eje S, es la velocidad de carrera del cortador (carreras por minuto), permite ser programable para cualquier combinación de avance, desbaste y acabado. Los ejes D y C, son los ejes de rotación del cortador y la pieza, respectivamente, también son programables y permiten varias combinaciones de velocidades entre ambos, dependiendo del trabajo a realizar, también se puede mover cada eje de manera independiente. El eje X es el avance radial, permite una precisión de 0.005 mm, permite hacer desbaste o un acabado de pieza mucho mejor que en una máquina convencional. La posición vertical de cortador está definida en el eje Z, en las máquinas convencionales se debía

ajustar este eje cada vez que se cambiaba de cortador, en las máquinas CNC esto supone un gran ahorro de tiempo. El eje V marca la longitud de carrera de corte, si se optimiza este parámetro se puede ahorrar tiempo en la operación de maquinado. El eje Y provee el ajuste necesario para un alivio de la herramienta óptimo y así prevenir interferencia de la pieza con el cortador en la carrera de retorno. El eje B es el ángulo de alivio del husillo (Sulzer, 1986).

La talladora de engranajes es una máquina herramienta muy versátil en la elaboración de varios componentes, que tuvo sus inicios a comienzos del siglo XIX y ha cambiado muy poco con el tiempo. Para esta investigación es muy importante conocer su funcionamiento, cinemática y partes principales del cortador, ya que esta información será crítica para poder para la optimización de los parámetros de operación.

Sin esta máquina, sería muy difícil poder realizar ciertos tipos de engranajes y se puede decir que su utilización es fundamental en la creación de engranajes automotrices.

Actualmente, existen muchos fabricantes de este tipo de máquinas, pero entre los más importantes figuran Gleason Pfauter, Mitsubishi y Fellows. En la planta de Daimler de SISAMEX se utiliza una talladora de engranajes CNC con sistema de alimentación automático marca Gleason modelo P200S con un cortador tipo disco marca Gleason, más detalles de esta serán discutidos posteriormente.

# **CAPITULO III**

## **TECNOLOGIA MECÁNICA**

### **3.1 Introducción**

Para poder entender un poco más el objetivo de esta investigación, es de suma importancia conocer ¿Qué es el desgaste de herramientas? y que factores están involucrados o contribuyen al mismo. El desgaste de herramientas es un tema de suma importancia en la manufactura de piezas, ya que repercute directamente en la producción, al afectar la calidad de producto. Si se desea minimizar el desgaste de las herramientas se puede bajar la velocidad, avance y profundidad de corte, pero esto recaería sobre los números de producción y no sería rentable para la planta.

Las operaciones de maquinado se realizan utilizando herramientas de corte. Las altas fuerzas y temperaturas durante el maquinado crean un ambiente muy agresivo para la herramienta. Las fuerzas de corte demasiado grandes fracturan la herramienta. Si la temperatura de corte se eleva demasiado, el material de la herramienta se ablanda y falla. Y si ninguna de estas condiciones ocasionan falla de la herramienta, de cualquier manera existe una acción continúa de desgaste de la herramienta de corte que la conduce finalmente a la falla (Escamilla, 2004) (Groover, 2007).

## 3.2 El desgaste progresivo de herramientas

La naturaleza fundamental de los mecanismos de desgaste puede ser diferente bajo condiciones de corte variadas. En el maquinado de metales, existen varias formas de desgaste: abrasión, adhesión, difusión, deformación plástica y fallas mecánicas.

A continuación se detalla un poco más sobre los distintos tipos de desgaste progresivo que se da en el maquinado de metales:

El **desgaste por adhesión** es cuando dos metales entran en contacto a alta presión y temperatura, ocurre una unión entre ellos. Esta condición se encuentra presente entre la viruta y la superficie de ataque de la herramienta. A medida que la viruta fluye a través de la herramienta, se rompen pequeñas partículas de la herramienta y se separan de la superficie, provocando el desgaste de la superficie. Es cuando en la zona de corte debido a las altas temperaturas, el material de corte y la herramienta se sueldan y al separarse, parte de la herramienta se desprende.

El desgaste conocido como **abrasión** ocurre cuando partículas duras debajo de la viruta pasan sobre la cara de la herramienta y remueven pequeñas porciones de la herramienta por acción mecánica. Es decir, es el desgaste producido por el contacto entre materiales más duros que la herramienta y la propia herramienta rayándola y desgastándola.

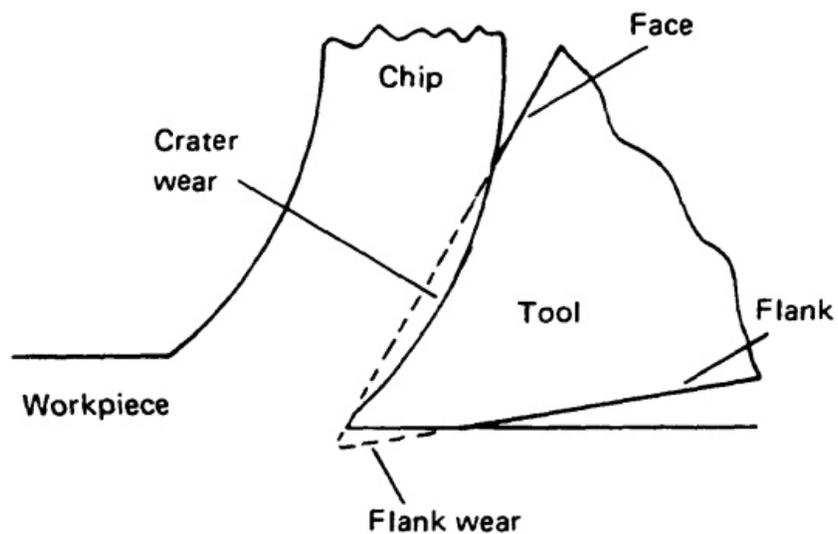
El **desgaste por difusión** es un intercambio de átomos a través de un límite de contacto entre dos materiales. En el caso del desgaste de la herramienta, la difusión ocurre en el límite herramienta-viruta y ocasiona que la superficie sufra una fatiga por los átomos que le imparten su dureza. Conforme este proceso continúa, la superficie de la herramienta se vuelve más susceptible a la abrasión y a la adhesión. Se cree que la difusión es el principal mecanismo del desgaste en cráter (Escamilla, 2004) (Groover, 2007).

Otro mecanismo que contribuye al desgaste de la herramienta es la deformación plástica del borde cortante. Las fuerzas de corte que actúan en el

borde de corte a altas temperaturas hacen que éste se deforme plásticamente, haciéndolo más susceptible a la abrasión de la superficie de la herramienta. La deformación plástica contribuye principalmente al desgaste del flanco (Escamilla, 2004).

El desgaste progresivo de la herramienta toma lugar de dos formas distintas, como se muestra en la figura 3.1:

1. Desgaste en la cara de la herramienta caracterizada por la formación de cráteres resultante de la acción del flujo de la viruta a través de la cara.
2. Desgaste en el flanco de la herramienta donde la superficie desgastada es producto de la fricción con la pieza a maquinar.



*Figura 3.1 – Regiones de desgaste de herramienta en el maquinado de metales (Boothroyd & Knight, 1989)*

### **3.2.1 Desgaste por cráter**

El desgaste por cráteres siempre se da en la cara de la herramienta y es más o menos de forma circular. El cráter no siempre se extiende hacia la punta

de la herramienta, pero puede terminar a distancias muy cercanas a la misma. El desgaste por cráteres incrementa las fuerzas de corte, modifica la geometría de la herramienta y suaviza la punta de la herramienta (Rao, 2009). El desgaste en cráter es una sección cóncava de la superficie de ataque de la herramienta, formada por la acción de la viruta que se desliza contra la superficie. Los altos esfuerzos y temperaturas caracterizan a la interface de contacto herramienta viruta y contribuyen a la acción de desgaste. El cráter puede medirse ya sea por su profundidad o por su área (Escamilla, 2004) (Groover, 2007).

### **3.2.2 Desgaste del flanco**

El desgaste que se produce en el flanco de la herramienta por debajo del borde corte se le conoce como desgaste de flanco. Siempre existirá el desgaste del flanco y no se puede evitar. No es una variable que deba preocupar al menos que la tasa de desgaste del flanco sea demasiado rápida o el área de incidencia se haga demasiado grande. En la práctica, una estimación visual se hace generalmente en lugar de una medición precisa, aunque en muchos casos el desgaste del flanco se ignora y el desgaste de la herramienta se "mide" por la pérdida de tamaño de la pieza. La mejor medida del desgaste de la herramienta, sin embargo, es el desgaste del flanco (Oberg, Jones, Horton , & Ryffel, 2008). El desgaste del flanco resulta del rozamiento entre la recién creada superficie de trabajo y la cara del flanco adyacente al borde de corte. El desgaste del flanco se mide por el ancho de la banda de desgaste. A esta banda se le llama frecuentemente banda de desgaste. Se pueden identificar varias características del desgaste del flanco. En primer lugar, aparece frecuentemente un desgaste extremo en el flanco sobre el filo de corte en el sitio que corresponde a la superficie original de la parte de trabajo. A éste se le llama muesca de desgaste, y ocurre porque la superficie original del trabajo es más dura y más abrasiva que el material interno. El endurecimiento por trabajo es provocado por el estirado en frío o por maquinados previos, así como por partículas de arena en la superficie de la fundición o por otras razones. Como consecuencia de la superficie más dura

el desgaste se acelera en esta región. El desgaste del radio de la nariz es la segunda región de desgaste del flanco que puede identificarse y conduce a la terminación del borde de corte (Escamilla, 2004). En la figura 3.2 se puede observar el desgaste del flanco y el desgaste por cráter.

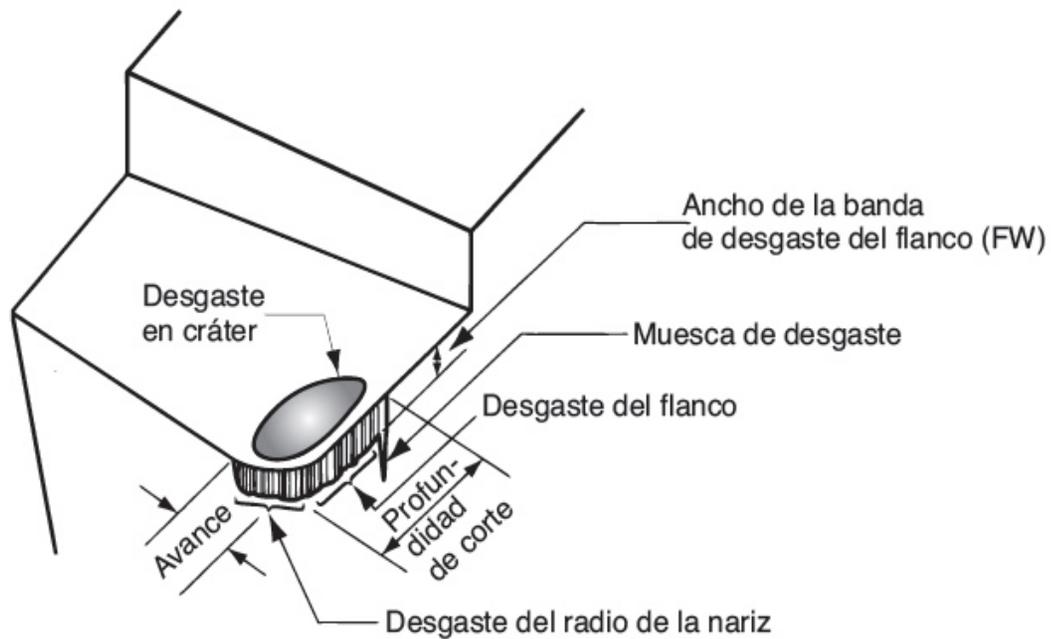


Figura 3.2 – Desgaste del flanco y desgaste por cráter (Groover, 2007).

### 3.3 Vida de las herramientas

La vida de la herramienta es definida como el tiempo de corte requerido para alcanzar el criterio de vida de herramienta. El criterio del desgaste de la herramienta se define como el valor predeterminado de una medida del desgaste de la herramienta. El factor que tiene mayor influencia en el desgaste de la herramienta es el la velocidad de corte (Boothroyd & Knight, 1989). En la figura 3.3 se puede observar la relación general de desgaste de la herramienta contra el tiempo de corte.

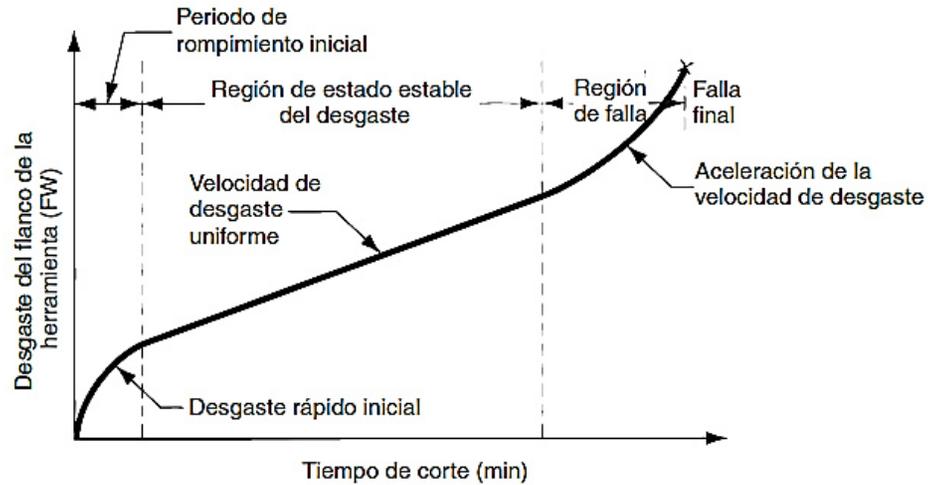


Figura 3.3 – Relación general de desgaste de la herramienta contra el tiempo de corte (Groover, 2007).

Aunque la relación que se ilustra es para el desgaste del flanco, existe una relación similar para el desgaste en cráter. Por lo general se pueden identificar tres regiones en la curva típica del crecimiento del desgaste. La primera es el periodo de rompimiento inicial en el cual el borde cortante afilado se desgasta rápidamente al entrar en uso. Esta primera región ocurre en los primeros minutos de corte. A éste período le sigue un desgaste a una velocidad más o menos uniforme y se le llama la región de desgaste de estado estable. En la figura ésta región se representa como una función lineal del tiempo, aunque en el maquinado real también hay desviaciones de la línea recta (Groover, 2007). Finalmente, el desgaste alcanza un nivel donde la velocidad del mismo empieza a acelerar. Esto marca el principio de la región de falla, donde las temperaturas de corte son aún más altas y la eficiencia del proceso se reduce. Si se continúa utilizando la herramienta de esta manera la herramienta finalmente fallará por un mal control.

En la producción se pueden definir varios criterios de vida de la herramienta por medio de distintos métodos, algunos se enlistan a continuación (Groover, 2007):

- La falla completa del corte cortante.
- Inspección visual por parte del operador del desgaste del flanco.

- La prueba al tacto del borde o filo.
- Los cambios en el sonido emitido por la operación.
- La viruta se vuelve más larga, enmarañada o difícil de eliminar.
- Degradación del acabado superficial.
- Mayor consumo de potencia de la máquina.
- Mediante la cantidad de piezas de trabajo.
- Tiempo acumulado de corte.

Actualmente, en la planta Daimler el criterio de vida de la herramienta se estima por la cantidad de piezas de trabajo realizadas, una vez se alcanza la cantidad de piezas de trabajo estipulada, el operador debe realizar el cambio de la herramienta por una nueva. Este criterio se definió en base a la geometría de la pieza de trabajo, al llegar aproximadamente a la cantidad límite ya la geometría de la pieza de trabajo presenta su máximo de dimensiones permisibles.

### **3.4 Materiales de las herramientas**

Las herramientas de corte deben operar bajo altas cargas a elevadas temperaturas, alguna en exceso de hasta 1,000 °C. Adicional a esto, ocurren condiciones severas de fricción entre la herramienta y la viruta, y la herramienta y la superficie de la pieza de trabajo. Los requisitos más importantes que deben tener los materiales de las herramientas de corte son:

1. Estabilidad física y química a altas temperaturas, dureza a altas temperaturas es un punto de gran importancia.
2. Alta resistencia al desgaste.
3. Alta resistencia a la fractura por fragilidad.

Un alto rendimiento en estos tres atributos generalmente no es posible. Por ejemplo, materiales con una resistencia a altas temperaturas y al desgaste se ven afectadas por fracturas por fragilidad. También existen otros factores que

influyen en el rendimiento de la herramienta como lo son, la dureza del material de la herramienta y la pieza de trabajo, las temperaturas de corte, la compatibilidad química entre las herramientas y la pieza de trabajo, las condiciones del maquinado, entre otras (Boothroyd & Knight, 1989).

La selección de herramientas de corte va a depender de la operación de corte a realizar, el material de la pieza, las propiedades de la máquina, la terminación superficial, etc. Para cumplir con cada uno de estos requisitos han surgido herramientas formadas por distintas aleaciones. Los materiales para las herramientas de corte incluyen aceros al carbono, aceros de mediana aleación, aceros de alta velocidad, aleaciones fundidas, carburos cementados, cerámicos u óxidos y diamantes. La tabla 3.1 muestra los tipos de materiales mayormente utilizados en orden de resistencia al desgaste y dureza en caliente.

*Tabla 3.1 – Tipos de materiales mayormente utilizados en herramientas de corte (Boothroyd & Knight, 1989).*

Dureza en caliente ↓	Resistencia al desgaste ↓	Aceros al carbon Aceros rapidos (HSS) Aleaciones fundidas Carburos de tungsteno Cermets Carburos de titanio Ceramicos Diamante policristalino y nitruro cubico de boro (CBN) Diamantes de un solo cristal	↑ Tenacidad
-------------------------	------------------------------	---	----------------

Con el avance en aleaciones de aceros para herramientas de corte, se han logrado incrementar características de las herramientas, como mayor resistencia al desgaste, reducción de la distorsión y pandeo, mayor tenacidad al impacto y mayor dureza en caliente. En la tabla 3.2 se muestra un resumen de las características mecánicas que mejoran al agregar ciertos elementos químicos.

Tabla 3.2 – Resumen de características según elemento químico (Escamilla, 2004).

Elemento	Cantidad (%)	Propiedades
Carbono, <b>C</b>	0.6 – 1.4	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Forma carburos con el hierro</li> <li>• Aumenta la dureza</li> <li>• Aumenta la resistencia mecánica</li> <li>• Aumenta la resistencia al desgaste</li> </ul>
Cromo, <b>Cr</b>	0.25 – 4.5	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aumenta la resistencia al desgaste</li> <li>• Aumenta la tenacidad</li> </ul>
Cobalto, <b>Co</b>	5 – 12	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se emplea en aceros de alta velocidad</li> <li>• Aumenta la dureza en caliente</li> <li>• Permite velocidades y temperaturas de operación más altas manteniendo la dureza y los filos</li> </ul>
Molibdeno, <b>Mo</b>	Hasta 10	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Elemento fuerte para formar carburos</li> <li>• Aumenta la resistencia mecánica</li> <li>• Aumenta la resistencia al desgaste</li> <li>• Aumenta la dureza en caliente</li> </ul>
Tungsteno, <b>W</b>	1.25 – 20	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mejora la dureza en caliente</li> <li>• Aumenta la resistencia mecánica</li> </ul>
Vanadio, <b>V</b>	Aceros al carbono 0.20 – 0.5, Aceros rápidos 1 – 5	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aumenta la dureza en caliente</li> <li>• Aumenta la resistencia a la abrasión</li> </ul>

### 3.4.1 Aceros de alta velocidad

Los aceros de alta velocidad (HSS por sus siglas en inglés) son aceros aleados que se componen en gran parte por tungsteno (aprox. 18%) y cromo (aprox. 4%); también pueden contener cobalto, vanadio y molibdeno. Durante el proceso de tratamiento térmico se forma carburos de los elementos aleados y se dispersan a través de todo el material en forma de partículas muy duras (Boothroyd & Knight, 1989). Existen cerca de 20 grados de aceros para herramientas de alta velocidad, cada uno con sus propias ventajas y limitaciones. Las herramientas de HSS son relativamente baratas y tenaces, pero tienen

limitada resistencia a la dureza en caliente y solo pueden ser utilizados en maquinados donde la temperaturas alcancen los 650 °C.

### **3.4.2 Aleaciones de fundición**

Las herramientas de aleaciones de fundición no contienen hierro y son hechas ya en su forma final. Consisten de cobalto, cromo, tungsteno y carbón. La fase de carburizado consiste en 25 a 30 % de volumen por matriz. Estas herramientas pueden ser utilizadas a velocidad un poco mayores que los aceros de alta velocidad, tienen menos tendencia a forma rebaba en el borde de corte durante el maquinado. Encuentran la mayor aplicación en el maquinado de hierro fundido, hierro maleable y bronce duros.

### **3.4.3 Carburos cementados**

El carburo cementado esta usualmente elaborado por una mezcla de polvo de tungsteno y carbón a altas temperaturas en una relación de 94 a 6 % respectivamente, por peso. Este compuesto luego es combinado con cobalto y la mezcla resultante es compactada y sinterizada en un horno a una temperatura de cerca de los 1,400 °C. Este material puede mantener valor altos de dureza a temperaturas tan altas como 1,200 °C y pueden incluso alcanzar velocidades más rápidas que los HSS y las aleaciones de acero fundido. La desventaja de este material es que no es tan tenaz y no se le puede dar forma luego del sinterizado. Son propensos a sufrir mucho desgaste por cráteres.

### **3.4.4 Carburos recubiertos**

El requisito básico para un eficiente maquinado del acero es un material de herramienta que exhiba la tenacidad del carburo de tungsteno, mientras que da una resistencia superior al desgaste del carburo de titanio. Es por esta razón que se ha mostrado mucho interés en el recubrimiento de carburos cementados

de tungsteno con una capa delgada de un material más duro. Estos recubrimientos están entre los 5 y 8  $\mu\text{m}$  de espesor y se ha demostrado que eliminan prácticamente la inter difusión entre la viruta y la herramienta. Los recubrimientos son aplicados por medio del depósito químico de vapor. Eventualmente, cuando el recubrimiento se ha desgastado por la abrasión, la tasa de desgaste es igual al de la herramienta sin recubrimiento.

### **3.4.5 Cerámicos y Cermets**

Las herramientas cerámicas están hechas de óxido de aluminio sinterizado ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) y polvo de boro y silicio; estos polvos se mezclan y se sinterizan a una temperatura de 1,700 °C. Los óxidos sinterizados pueden ser utilizados a velocidades de dos a tres veces más que las utilizadas por los carburos de tungsteno, son muy duros y tienen muy alta fuerza compresiva y baja conductividad térmica. Sin embargo, son extremadamente frágiles y solo son utilizados en operaciones donde no ocurren vibraciones ni impactos. Se utilizan más que todo en maquinado de acabado de alta velocidad.

Las herramientas de cermets están hechas de 70 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$  y 30 % de carburo de titanio. Estos materiales son tenaces y más resistentes a las fracturas que los cerámicos, pero más suaves. La alta tenacidad y dureza de los cermets permite que se utilicen en velocidades más altas que los carburos y tienen la ventaja de que se pueden utilizar en operaciones de maquinado interrumpido.

### **3.4.6 Policristalinos**

Las herramientas de policristalinos son fabricadas mediante la compactación de pequeñas partículas de diamante (sintéticos y natural) o nitruro cúbico de boro (CBN por sus siglas en inglés) a condiciones de alta presión y temperatura. Los diamantes de un solo cristal son utilizados para operaciones de acabado fino. A pesar de que los diamantes naturales son el material más duro conocido, su estructura cristalina es poco resistente. Las herramientas poli

cristalinas son más homogéneas, con una mejora en la resistencia y durabilidad, pero con una pequeña disminución en la dureza, esto en comparación con un diamante natural.

La talladora de engranajes que se utiliza en la planta Daimler, utiliza un cortador con un material conocido como CPM Rex 76, conocido por el Instituto Americano del Hierro y Acero (AISI por sus siglas en inglés) como M48. Este material tiene una dureza de 67 a 69 HRC. Posteriormente, se ampliará un poco más su composición.

### **3.5 Recubrimientos de las herramientas**

En la actualidad, las herramientas de corte se utilizan muy poco con el material base sin recubrimiento, el hecho de producir herramientas más eficientes y duraderas ha llevado al desarrollo de maneras de hacerlas más resistentes. Por esta razón se ha optado por recubrirlas con un material metálico que aumente la dureza en los filos de corte, facilite la disipación de calor acumulado en el filo e incremente la resistencia a la abrasión. A continuación se describe un poco más a detalle, algunos de los tipos de recubrimientos que existen.

#### **a) Recubrimientos de TiAlN**

Este tipo de recubrimiento fue desarrollado a mediados de los años 80 y ganó popularidad durante los años 90. Son los que más se utilizan actualmente, y poco a poco van dejando atrás a los demás. Los recubrimientos de TiAlN son recubrimientos extra duros, basados en nitruro de titanio aluminio que destacan por su dureza, estabilidad térmica y resistencia a ataques químicos. Protegen las aristas de corte por abrasión y adhesión, así como por carga térmica. Existen dos tipos de recubrimientos de TiAlN, los multicapa y los monocapa.

Los recubrimientos de TiAlN multicapa combinan la elevada tenacidad de la estructura multicapa, con su alta dureza HV 3,000 y la buena estabilidad térmica hasta 800 °C, y química de la capa TiAlN. Así protege las herramientas

de corte de acero rápido y metal duro contra el desgaste prematuro producido por tensiones severas. Debido a su estabilidad térmica, permite trabajar en mecanizados a altas velocidades e incluso en seco o con mínima cantidad de lubricante (Correa) (Escamilla, 2004) (Gonzalez, 2004).

Los recubrimientos de TiAlN monocapa fueron desarrollados para su aplicación en fresas de metal duro utilizadas en condiciones de mecanizado severas. Su elevada dureza (HV 3,500), y notable estabilidad térmica hasta 800 °C, además de su química hacen que sea óptimo para las fresas que se utilizan en el mecanizado de materiales térmicamente tratados, como por ejemplo en moldes, punzones, matrices y utillajes de forja (Escamilla, 2004) (Gonzalez, 2004).

#### **b) Recubrimientos de diamante**

Se utiliza en herramientas para mecanizar materiales muy abrasivos como el grafito. Durante el mecanizado de estos materiales las herramientas se desgastan rápidamente y la calidad de las superficies mecanizadas y la precisión dimensional son pobres. Con las herramientas recubiertas de diamante, un recubrimiento cuya dureza es superior a los HV 8,000, además de obtener una vida útil más larga y poder aumentar las velocidades de corte, disminuyendo así de manera importante el tiempo de mecanizado, se consigue un buen acabado de la superficie y una buena precisión dimensional (Escamilla, 2004) (Gonzalez, 2004).

#### **c) Recubrimientos de WC/C (Carburo de Tungsteno)**

Este es realizado por deposición física al vapor a temperaturas alrededor de los 200° C. Al realizarse el proceso de recubrimiento en alto vacío, las propiedades del recubrimiento son sustancialmente mejores que las logradas a presión atmosférica (proyección térmica), o en gases y baños (nitruración, galvanizado). Los recubrimientos tienen un espesor de capa de solo unas micras de espesor y son la última operación dentro de los componentes de precisión.

Este recubrimiento presenta una combinación única de características: bajo coeficiente de fricción, alta resistencia al desgaste, una excelente capacidad de carga (Escamilla, 2004) (Gonzalez, 2004).

#### d) Recubrimientos de TiAlN monocapa combinado con WC/C

Este recubrimiento hace frente a todos aquellos mecanismos de desgaste que se dan en la formación y evacuación de viruta. Este recubrimiento combina la alta dureza y estabilidad térmica del recubrimiento TiAlN con las buenas propiedades de deslizamiento y lubricación del recubrimiento WC/C (Carburo de Tungsteno). Se utiliza sobre todo en taladrados y roscados (Correa) (Escamilla, 2004) (Gonzalez, 2004).

#### e) Recubrimientos utilizados en la producción de engranajes

Los recubrimientos utilizados actualmente en la producción de engranajes son principalmente TiAlN, TiAlN-X y los AlCrN. Los TiAlN-X son utilizados principalmente en herramientas hechas de materiales hechos de carburos. Existen también recubrimientos de nano compuestos, que comprenden partículas nanos de TiAlN incrustadas en una matriz no cristalina de nitruro de silicio ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ), obteniendo así una alta resistencia a la oxidación. La tabla 3.3 enlista alguna de las propiedades de los recubrimientos utilizados hoy en día en la producción de engranajes (Maiuri, 2009).

Tabla 3.3 – Propiedades de los recubrimientos utilizados hoy en día (Maiuri, 2009)

	TiN	TiCN	TiAlN	TiAlN-X	AlCrN
Dureza (HV 0.05)	2300	3000	3300	3500	3200
Coeficiente de fricción	0.4	0.4	0.30-0.35	0.4	0.35
Max. Temp. de servicio	600 °C	400 °C	900 °C	800 °C	1100 °C
Color	Dorado	Azul-Gris	Violeta-Gris	Violeta-Gris	Azul-Gris
Estructura	Monocapa	Multicapa	Nanocapa	Monocapa	Monocapa
Aplicación	Seco	Húmedo	Seco y Húmedo	Seco y Húmedo	Seco y Húmedo

### **3.5.1 Tecnologías de recubrimiento de herramientas**

La tecnología de recubrimiento más común es la deposición química por vapor, o CVD, que opera a una temperatura de aproximadamente 1000° C. Casi tan común como la anterior es la deposición física por vapor, o PVD, que opera en el otro extremo del espectro de temperatura, en el rango de los 400° C.

#### **a) Proceso PVD**

Este es un proceso por arco eléctrico y/o pulverización catódica. El medio de evaporación durante la etapa de recubrimiento es siempre físico. Por ello la denominación genérica de: proceso de deposición física en fase vapor. La característica particular del recubrimiento PVD (Physical Vapour Deposition, por sus siglas en inglés), es la alta estabilidad dimensional de las herramientas, dado que es posible una aplicación de capa por debajo de la temperatura de revenido ya que las temperaturas a las que se realiza el recubrimiento se encuentran entre 200 - 500 °C (Gonzalez, 2004).

#### **b) Proceso CVD**

Los recubrimientos CVD (Chemical Vapour Deposition, por sus siglas en inglés) parten de un compuesto (precursor) gaseoso o fácilmente evaporable del metal a obtener en la capa. Los halogenuros y muy especialmente cloruros son los compuestos industriales más empleados ( $TiCl_4$ ,  $AlCl_3$ ,  $BCl_4$ ). El compuesto gaseoso reacciona a temperaturas cercanas a 1.000°C con un reductor también en estado gaseoso (hidrógeno) para obtener iones metálicos. Los iones obtenidos in situ reaccionan a su vez con gases reactivos como hidrógeno, metano o mezclas de ambos formando el compuesto deseado. Este compuesto condensa sobre la superficie del sustrato difundiendo en él debido a la alta temperatura (Gonzalez, 2004).

### **3.6 Maquinabilidad**

El término maquinabilidad es aplicado a los materiales de trabajo para describir sus propiedades de maquinado; puede tener diferentes significados dependiendo del proceso de corte en consideración. Para evaluar la maquinabilidad se utilizan varios criterios como la vida de las herramientas, fuerzas, potencia, acabado superficial y la facilidad de eliminación de la viruta.

Aunque la maquinabilidad se refiere generalmente al material de trabajo, debe reconocerse que el buen desempeño del maquinado no depende solamente del material. El tipo de operación de maquinado, la herramienta y las condiciones de corte son también factores importantes, así como las propiedades del material. Además, el criterio de maquinabilidad es también una fuente de variación. Un material puede prolongar la vida de la herramienta, mientras que otro suministra un mejor acabado superficial. Todos estos factores hacen difícil la evaluación de la maquinabilidad (Escamilla, 2004).

El desempeño del maquinado de un material de prueba se mide en relación con el material base. Las medidas posibles de desempeño en el ensayo de la maquinabilidad incluyen, la vida de las herramientas, el desgaste de las herramientas, la fuerza de corte, la potencia de operación, la temperatura de corte, la velocidad de remoción de material y las vibraciones generadas en el maquinado (Gonzalez, 2004).

### **3.7 Fluidos de corte**

Al utilizar cortadores de acero de alta velocidad se generan altas temperaturas entre la herramienta de corte y el material de trabajo, debido a la fricción que existe entre ambas. Los fluidos de corte, usualmente en forma de líquidos, se aplican en la zona de formación de la viruta para mejorar las condiciones de corte. Estas mejoras pueden ser diversas dependiendo del material de la herramienta y la pieza de trabajo, el fluido de corte y las condiciones de corte. Las dos formas más importantes en las que actúan los fluidos de corte

son como refrigerante y como lubricante (Boothroyd & Knight, 1989). Un fluido para corte es un líquido o gas que se aplica directamente a la operación de maquinado para mejorar el desempeño del corte. Además de la remoción del calor y la reducción de la fricción, los fluidos para corte brindan beneficios adicionales como: remover las virutas, reducir la temperatura de la parte de trabajo para un manejo más fácil, disminuir las fuerzas de corte y los requerimientos de potencia, mejorar la estabilidad dimensional de la parte de trabajo y optimizar el acabado superficial (Escamilla, 2004) (Gonzalez, 2004).

Los fluidos de corte que actúan como refrigerantes tienen diferentes ventajas dentro del proceso de corte, como incrementar la vida de la herramienta a través de la reducción de la temperatura, mejor manejo de la pieza ya acabada y una reducción de la distorsión térmica causados por los gradientes de temperatura en el material de la pieza. Estos dos últimos factores son los más importantes en los procesos de rectificado.

Los fluidos de corte que actúan como lubricantes dan como resultado una reducción en la fricción sobre la herramienta de corte y la pieza de trabajo, esta disminución de fricción a su vez produce una reducción de la potencia de trabajo requerida para el maquinado, un incremento en la vida de la herramienta y más importante aún, una mejora en el acabado superficial. Es sabido, que se logra una considerable reducción en la media del coeficiente de fricción en la cara y el flanco de la herramienta, en condiciones donde se utiliza el correcto lubricante para la debida operación (Boothroyd & Knight, 1989).

Las características más importantes de los fluidos de corte de acuerdo a (Gonzalez, 2004).

- Buena capacidad de enfriamiento
- Buena capacidad lubricante
- Estabilidad
- No tóxico
- Transparente

- Baja viscosidad
- No inflamable

La elección de un buen fluido de corte trae consigo ventajas económicas como la reducción de costos de producción, aumento de la velocidad de producción, reducción de costos en energía eléctrica y aumento en la calidad del acabado de las piezas producidas. La tabla 3.4 muestra las características de generales de los fluidos de corte miscibles con agua.

Tabla 3.4 - características de generales de los fluidos de corte (Boothroyd & Knight, 1989).

Tipo de Lubricante	Características
<b>Aceites solubles y emulsificantes</b> Uso general	Utilizado en diluciones de 1:10 y 1:40. Da como resultado una emulsión lechosa. Utilizado para todo propósito en el maquinado.
Tipo claro	Utilizado en diluciones de 1:20 y 1:60. Su alto emulsificante da como resultado emulsiones que varían desde lo traslucido a claro. Utilizado para rectificado y maquinado en general.
Graso	Utilizado a concentraciones similares a los de uso general. Da como resultado una apariencia similar a una emulsión lechosa. Su contenido graso lo hace efectivo para las operaciones normales de maquinado en metales no ferrosos.
Alta presión	Generalmente contiene aditivos de sulfuro o clorinados de alta presión. Utilizados en diluciones de 1:10 y 1:20. Tiene mayor rendimiento que los demás tipos arriba mencionados.
<b>Soluciones químicas</b> Fluidos para rectificado	Son esencialmente soluciones químicas inhibidoras de óxido en agua. Se utilizan diluciones de 1:50 y 1:100 para operaciones de rectificado en acero y hierro.
Sintético de uso general	Contienen principalmente solubles acuosos inhibidores de óxido y otros aditivos. Se utilizan en diluciones de 1:10 y 1:40 para cortes y diluciones más grandes para rectificados. Sirven tanto para metales ferrosos como los no ferrosos.
Sintético de alta presión	Similares a los sintéticos de uso general solo que contiene aditivos de alta presión, que lo dota de buen rendimiento en el maquinado de metales ferrosos.

El fluido de corte utilizado para el proceso de tallado de engranajes en SISAMEX es un aceite anti-niebla para operaciones de corte severas en metales ferrosos de la marca Mobil, modelo Mobilmet 766. Este fluido se recomienda para operaciones de corte extremadamente severas en metales ferrosos difíciles de

maquinar, cuyo índice de maquinabilidad es inferior a 50% tales como aceros inoxidable, titanio y sus aleaciones. Este fluido extiende los periodos de reafilado, aumenta la vida de la herramienta, mejora el acabado de las piezas maquinadas y brinda un ambiente más limpio para los operadores.

### **3.8 Rugosidad superficial**

La rugosidad superficial obtenida luego de una operación de maquinado puede ser considerada como la suma de dos efectos independientes (Boothroyd & Knight, 1989):

1. La rugosidad superficial “ideal”, que es el resultado de la geometría de la herramienta y el avance o la velocidad de avance.
2. La rugosidad superficial “natural”, que es el resultado de las irregularidades en la operación de corte.

La rugosidad de una superficie maquinada depende de muchos factores que pueden agruparse de la siguiente manera: factores geométricos, factores de material de trabajo y los factores de vibración y de la máquina herramienta (Groover, 2007).

*Los factores geométricos* determinan la geometría de la superficie en una pieza maquinada. Éstos incluyen: el tipo de operación de maquinado; la geometría de la herramienta de corte y el avance. La característica de la superficie que resulta de estos factores es la rugosidad superficial “ideal” o “teórica” que se obtendría en ausencia de los factores del material de trabajo, de la vibración y de la máquina herramienta.

La geometría de la herramienta y el avance se combinan para formar la geometría de la superficie. En la geometría de la herramienta, el factor importante es la forma de la punta de la herramienta. Los efectos pueden verse para una herramienta de punta sencilla en la figura 3.4. Con el mismo avance, un mayor radio de nariz causa marcas de avance menos pronunciadas, lo que produce un

mejor acabado. Si se comparan dos avances con el mismo radio de la nariz, el avance más grande aumenta la separación entre las marcas de avance y conduce a un incremento en el valor de la rugosidad superficial ideal. Si la velocidad de avance es lo suficientemente grande y el radio de la nariz es lo suficientemente pequeño, de manera que el filo de corte frontal participe en la creación de la nueva superficie, entonces el ángulo del filo de corte frontal (AFCF) afectará la geometría de la superficie. En este caso, un mayor AFCF producirá un valor de la rugosidad superficial más alto. En teoría, un AFCF igual a cero podría producir una superficie perfectamente suave; sin embargo, las imperfecciones de la herramienta, del material de trabajo y del proceso de maquinado impiden alcanzar un acabado ideal como éste (Groover, 2007).

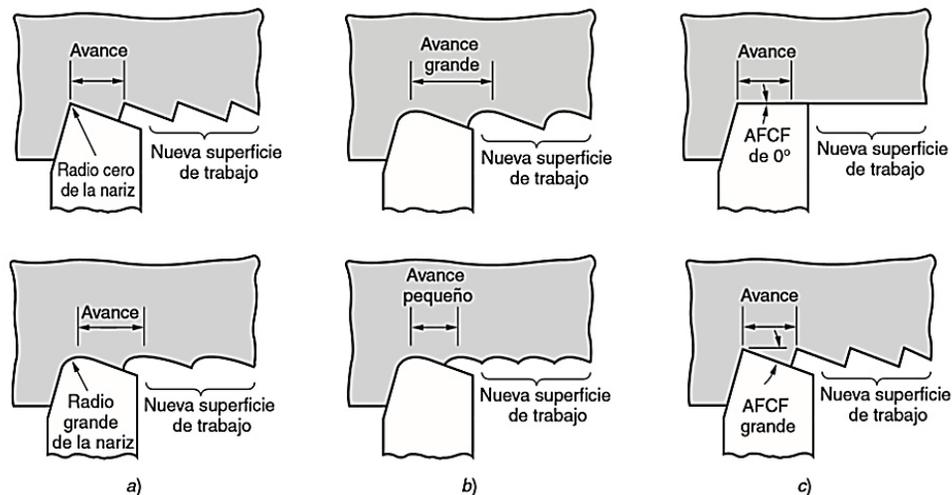


Figura 3.4 - Efecto de los factores geométricos en la determinación del acabado teórico sobre una superficie de trabajo para herramientas de punta sencilla: a) efecto del radio de la nariz, b) efecto del avance y c) efecto del ángulo del filo de corte frontal (AFCF).

**Los factores del material de trabajo;** en la mayoría de las operaciones de maquinado, no es posible alcanzar el acabado ideal de la superficie, debido a los factores que se relacionan con el material de trabajo y a su interacción con la herramienta. Los factores del material de trabajo que afectan el acabado son: 1) efectos de recrecimiento del filo (AEF), debido a que se forma una AEF que se desprende en algún momento, las partículas se depositan en la superficie de

trabajo recién creada y ocasionan una textura rugosa parecida al del papel de lija; 2) daño a la superficie causado por la viruta enredada en el trabajo; 3) desgarramiento de la superficie de trabajo durante la formación de viruta cuando se maquinan materiales dúctiles; 4) grietas en la superficie causadas por la formación discontinua de viruta cuando se maquinan materiales quebradizos y 5) fricción entre el flanco de la herramienta y la superficie de trabajo recién generada. Estos factores del material de trabajo son influidos por la velocidad de corte y el ángulo de inclinación, de manera que un aumento de la velocidad de corte o del ángulo de inclinación produce mejor acabado superficial (Groover, 2007).

***Factores de vibración y de la máquina herramienta;*** estos factores se relacionan con la máquina herramienta, con las herramientas utilizadas y con la instalación de la operación. Incluyen el traqueteo o vibración de la máquina o de la herramienta de corte, la deflexión de los montajes que es una resultante frecuente de la vibración y el juego entre los mecanismos de avance, particularmente en máquinas herramienta antiguas. Si estos factores de la máquina herramienta pueden minimizarse o eliminarse, la rugosidad superficial en el maquinado será determinada primordialmente por los factores geométricos y los factores del material de trabajo descritos antes. El traqueteo o vibración en la operación de una máquina puede producir ondulaciones pronunciadas en la superficie de trabajo. El operador puede distinguir un ruido característico cuando ocurre el traqueteo. Los pasos posibles para reducir o eliminar la vibración incluyen 1) añadir rigidez o amortiguación a la instalación, 2) operar a velocidades que no causen fuerzas cíclicas cuya frecuencia se aproxime a la frecuencia natural del sistema de la máquina herramienta, 3) reducir los avances y las profundidades para disminuir las fuerzas de corte y 4) cambiar el diseño del cortador para reducir fuerzas. La geometría de la pieza de trabajo también puede tener influencia en el traqueteo. Las secciones transversales delgadas tienden a incrementar la posibilidad de traqueteo; por lo tanto, requieren soportes adicionales para mitigar esta condición (Groover, 2007).

### 3.8.1 Curvas de rugosidad superficial P y R

Existen dos curvas importantes cuando se evalúa la rugosidad superficial: la curva P y la curva R. La curva P (perfil sin filtrar) es un perfil resultante de la intersección de una superficie con un plano perpendicular, como lo muestra la figura 3.5a. A menos que se especifique otra circunstancia, la intersección debe de ser en la dirección en la cual el perfil representa el máximo valor de la rugosidad de la superficie; por lo general es en la dirección perpendicular a las marcas del maquinado sobre la superficie. La curva R (perfil de rugosidad) es un perfil que se obtiene de la curva P removiendo los componentes de ondulación de baja frecuencia, cuyas longitudes de onda son mayores que un límite especificado de la longitud de onda llamado valor cut-off ( $\lambda_C$ ), como lo muestra la figura 3.5b (Escamilla, 2004).

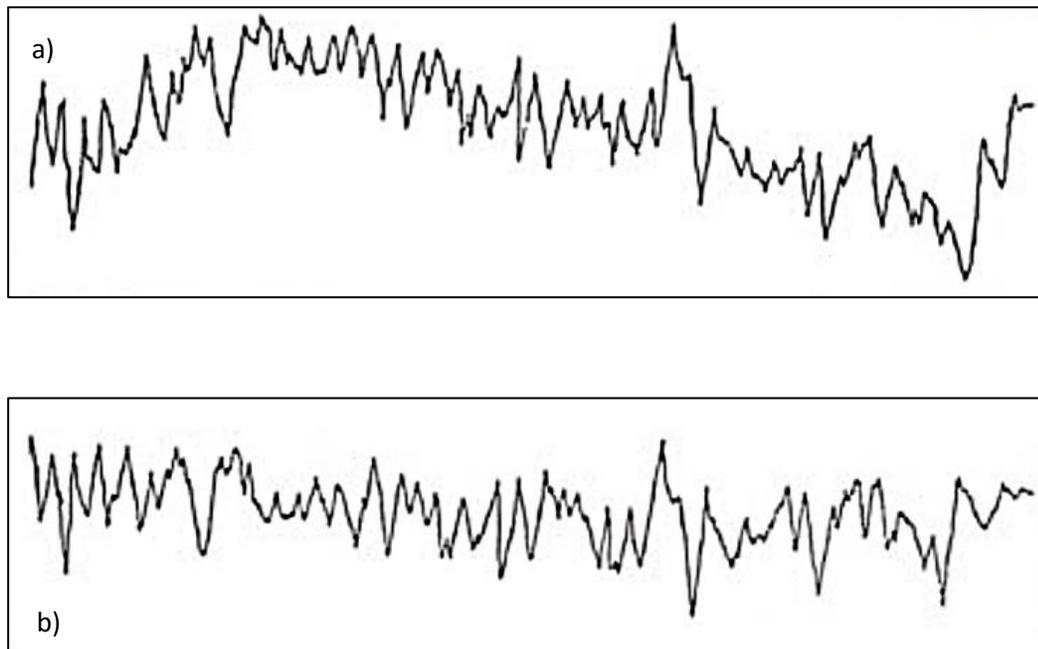


Figura 3.5 – a) Curva P (perfil de rugosidad sin filtrar y b) Curva R (perfil de rugosidad) (Escamilla, 2004).

En el rugosímetro la longitud de muestreo se varía por medio de filtros que modifican la frecuencia de respuesta del amplificador y, por lo tanto, la forma de onda del perfil para dar lo que se denomina valor de cut-off.

El cut-off es el medio a través del cual el perfil resultante de la forma de onda simula la restricción de la evaluación de la longitud de muestreo. Por conveniencia el cut-off es citado como la longitud de muestreo equivalente.

Una línea de referencia con las formas del perfil geométrico y que divide al perfil de modo que, dentro de la longitud de muestreo, la suma de los cuadrados de los alejamientos del perfil desde esta línea es un mínimo, se denomina línea media.

Las medidas de la rugosidad por el método de perfil están basadas en una línea central que es paralela a la línea medida del perfil a través de la longitud de evaluación, de modo que dentro de esta longitud la suma de las áreas limitadas por la línea central y el perfil es igual en ambos lados (figura 3.6) (Escamilla, 2004).

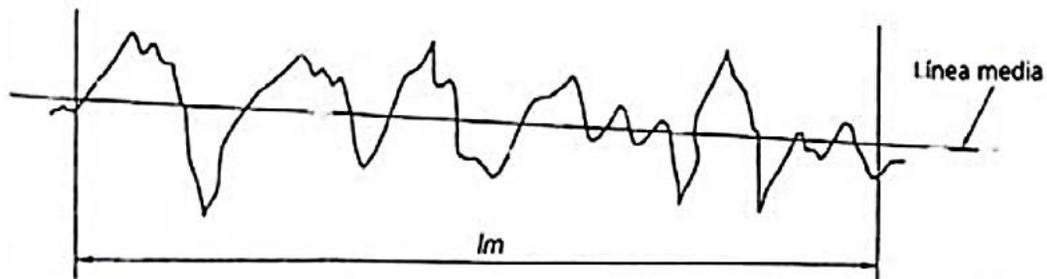


Figura 3.6 – Línea media en la toma de medidas de la rugosidad (Escamilla, 2004).

### 3.8.2 Definición de $R_a$ y $R_z$

La definición de  $R_a$  equivale, en términos prácticos, a la altura de un rectángulo de longitud ( $l_m$ ) cuya área es igual, dentro de la longitud de evaluación, a la suma de las áreas delimitadas por el perfil de rugosidad y la línea central. Esto se representa mediante el procedimiento mostrado en la figura 3.7; así  $R_a$  es la rugosidad promedio o desviación media aritmética del perfil. Y se representa por la siguiente fórmula (Groover, 2007):

$$R_a = \frac{1}{lm} \int_0^{lm} |y(x)| dx \quad (3.1)$$

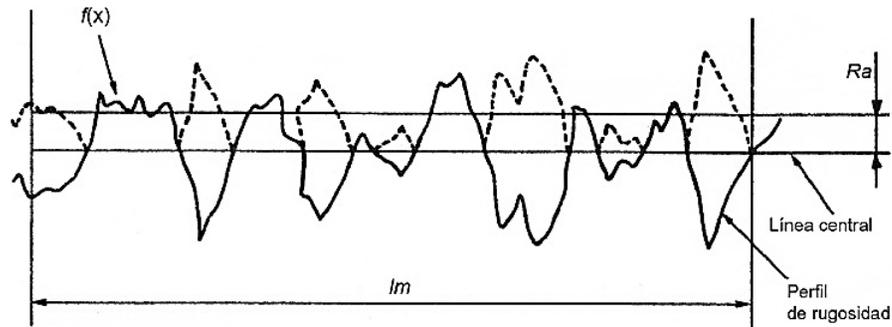


Figura 3.7 – Definición de  $R_a$ , rugosidad promedio (Escamilla, 2004).

$R_a$  es el único parámetro de este tipo definido en la Norma de Estados Unidos, Canadá, Países Bajos y Suiza. También está bien definido en las normas de todos los países industrializados y en las normas internacionales ISO, por lo tanto es el más ampliamente utilizado.

Por otra parte, el promedio de las alturas de pico a valle se denomina  $R_z$ , y las normas JIS e ISO lo definen como la diferencia entre el promedio de las alturas de los cinco picos más altos y la altura promedio de los cinco valles más profundos. Los picos y valles se miden en la dirección de la amplificación vertical, dentro de la longitud de evaluación ( $lm$ ), desde una línea paralela a la línea media y que no intercepta al perfil, como se muestra en la figura 3.8, y queda expresada con la siguiente fórmula (Estandarización, 1994):

$$R_z (JIS - ISO) = \frac{\sum_{i=1}^5 P_i + \sum_{i=1}^5 V_i}{5} \quad (3.2)$$

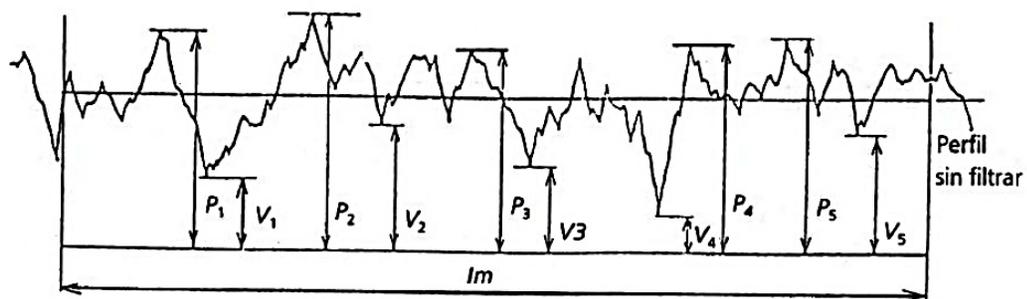


Figura 3.8 – Definición de  $R_z$ , Promedio de las altura de pico a valle en cinco mediciones (Escamilla, 2004).

La norma DIN define a  $R_z$  como el valor promedio de la diferencia ( $Z_i$ ) entre el pico más alto y el valle más bajo de cinco sucesivas longitudes de muestreo ( $l_e$ ) dentro de la longitud de evaluación ( $l_m$ ), medida en la dirección de la línea media, mostrado en la figura 3.9 y queda expresada con la siguiente fórmula (Normung, 1990):

$$R_z (DIN) = \frac{\sum_{i=1}^5 Z_i}{5} \quad (3.3)$$

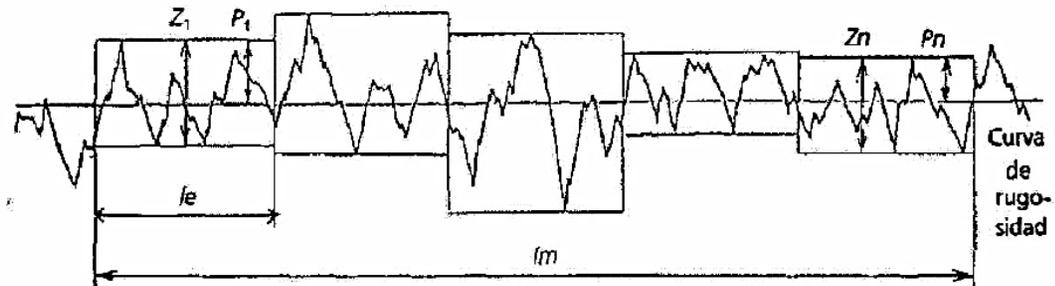


Figura 3.9 – Definición de  $R_z$  bajo la norma DIN (Escamilla, 2004).

### 3.9 Estudios previos sobre análisis y predicción del desgaste de herramientas

El desgaste de herramientas siempre ha sido un tema de mucho interés en el área científica, la constante aparición y evolución de nuevos materiales hacen que el maquinado esté en constante cambio. Es por esta razón que a lo largo del tiempo se ha estudiado la forma de predecir y analizar el desgaste en las herramientas de corte, para así empujar y entender los límites de la manufactura. Hacer más duraderas las herramientas, reducir los costos de producción y aumentar la vida de las herramientas son solo algunos de los temas que más se investigan en esta área.

Krishnakumar et al. (Krishnakumar, Rameshkumar, & Ramachandran, 2015), llevaron a cabo experimentos basados en señales de vibración para clasificar la condición de la herramienta durante el maquinado a alta velocidad de una aleación de titanio en un equipo de fresado CNC. Durante el proceso de

maquinado las señales fueron continuamente monitoreadas por medio de acelerómetros. Las características de la señal fueron extraídas y un conjunto de características destacadas fueron seleccionadas utilizando la técnica de reducción de dimensionalidad. Las funciones seleccionadas se dieron como una entrada al algoritmo de selección para decidir acerca de la condición de la herramienta. La selección de características se llevó a cabo utilizando el algoritmo de árbol de selección J48 y redes neuronales artificiales. A partir del análisis, se encontró que las redes neuronales producen muy buenos resultados en comparación con el algoritmo de árbol de selección. Ambos métodos predicen las condiciones de la herramienta con una eficiencia de clasificación de 94.3% y 95.4%, respectivamente.

Calva y Helguero (Calva Cumbicus & Helguero Alcívar), determinaron el tiempo de vida útil de una herramienta de corte utilizada en el proceso de torneado para maquinar acero AISI D6. El desgaste se determinó a través de la ecuación de Taylor y el criterio de desgaste en el flanco. El criterio de desgaste en el flanco establece que una herramienta de corte se declara como no servicial cuando el desgaste en el flanco alcanza un valor de 0.3 mm bajo condiciones de desgaste uniforme. La medición del desgaste en el flanco se realizó mediante el uso de un microscopio electrónico de barrido (MEB).

Aramesh et al. (Aramesh, Attia, Kishawy, & Balazinski, 2016), realizaron un estudio para determinar el tiempo de vida restante en insertos desgastados. Este estudio se llevó a cabo mediante el modelo de riesgos proporcionales (MRP). Una de las ventajas de este modelo, es que toma en cuenta el efecto de deterioro, en adición a los efectos de los parámetros de corte. Otra de las ventajas que demostró este modelo fue que se podían tomar en cuenta variables incontrolables como el desgaste de la herramienta y contribuían al modelo. La exactitud de estos resultados fue puesta a prueba mediante la validación de los experimentos, lo que demostró una buena aceptación.

Ayed et al. (Ayed, Germain, Ammar, & Furet, 2015), analizaron la influencia de la velocidad de corte y la presión de bombeo de agua en la evolución del

desgaste de la herramienta y las fuerzas de corte. Para este estudio se utilizó un torno CNC “LEAD-WELL LTC25iL” y una bomba de agua a presión PCLNR 2525M12. El lubricante utilizado era una mezcla de 95% agua y 5% aceite soluble. Como resultado se obtuvo que la vida de la herramienta puede ser incrementada hasta 9 veces por el uso de la bomba de presión a una presión fija de 100 bar, como lo muestra la figura 3.10b; mientras, que la velocidad de corte se pudo aumentar hasta un 30% para los mismos 15 minutos de vida de la herramienta.

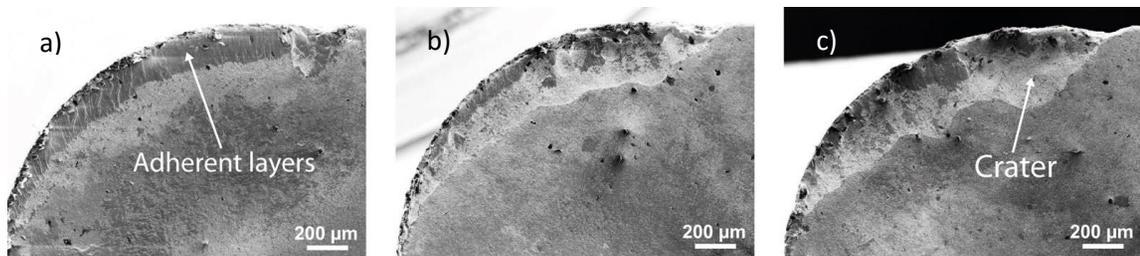


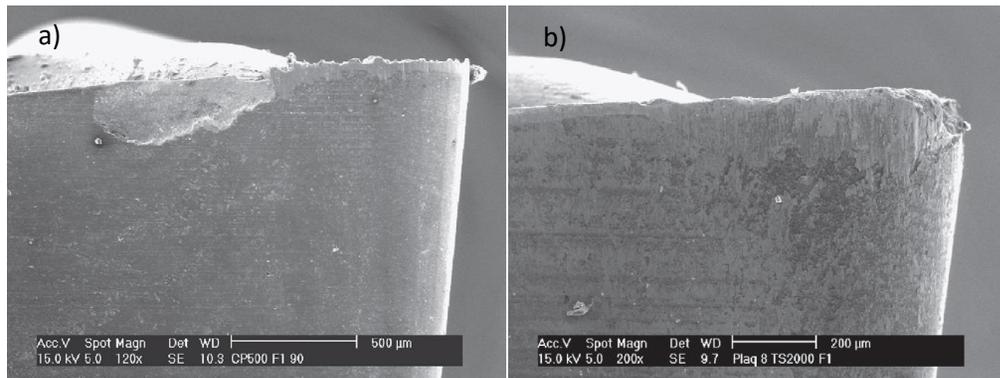
Figura 3.10 – Craterización a) lubricación convencional, b) 100 bar, c) 250 bar (Ayed, Germain, Ammar, & Furet, 2015).

Bordin et al. (Bordin, Bruschi, Ghiotti, & Bariani, 2015), evaluaron el mecanismo de desgaste de herramientas que surge en el semi-acabado torneado del Ti6Al4V bajo condiciones secas y criogénicas, utilizando insertos recubiertos de carburo de tungsteno a diferentes velocidades de corte y avances. El desgaste del flanco en la región de la nariz del inserto fue medido por MEB. Para investigar el material adherido al borde de corte y cara de la herramienta, se utilizó un espectroscopio y rayos x de energía dispersiva (EDS, por sus siglas en inglés). El uso de un perfilómetro 3D fue necesario para evaluar el desgaste por adherencia y abrasividad. Los resultados obtenidos demostraron que entre más alta es la velocidad de corte y el avance, más alto es el desgaste en la herramienta, también se encontró que el maquinado por enfriamiento criogénico redujo considerablemente el desgaste por adherencia en la herramienta en comparación a las condiciones de maquinado en seco.

Krolczyk et al. (Krolczyk, Nieslony, & Legutko, 2014), determinaron la vida de una herramienta de corte recubierta de carburo y la topografía de la superficie,

sometida al maquinado de acero inoxidable doble. También lograron identificar los mecanismos de desgaste a los que está sometida la herramienta de corte. Para la medición del desgaste de la herramienta se utilizó MEB. En base a los resultados determinaron que se podía obtener una mayor vida de la herramienta a bajos avances; mientras que el uso de lubricantes con base de aceite afectó negativamente la durabilidad de la herramienta de corte hasta en un 65%.

Cantero et al. (Cantero, Díaz-Álvarez, Miguélez, & Marín, 2013), realizaron un análisis de los mecanismos de desgaste en la rectificación del material Inconel 718, una de las aleaciones de níquel más utilizadas en la industria. Se estudiaron herramientas con recubrimientos de carburo (TiAl y TiAlN). El análisis se llevó a cabo bajo condiciones de maquinado en seco y húmedo. Las pruebas experimentales fueron hechas para obtener patrones evolutivos de desgaste que dieran pie a lo que está sucediendo en el proceso, como se muestra en la figura 3.11a y 3.11b. Los resultados indicaron que el tiempo de vida de la herramienta se reduce en condiciones de maquinado en seco. Diferentes mecanismos de desgaste fueron observados debido al endurecimiento de la aleación de níquel durante el maquinado.



*Figura 3.11 – a) Tipo de desgaste primario en seco, b) Desgaste de tipo muesca en seco (Cantero, Díaz-Álvarez, Miguélez, & Marín, 2013)*

Por otra parte, Muñoz et al. (Muñoz-Escalona, Díaz, & Cassier, 2012), desarrollaron un modelo empírico para predecir los mecanismos de desgaste que sufre una herramienta de corte en el fresado del acero AISI 1045. Adicionalmente,

desarrollaron una expresión para obtener la velocidad crítica donde el desgaste por difusión empezaría a aparecer. El método estadístico de Taguchi fue utilizado, ya que reduce considerablemente el tiempo y el costo de los experimentos. Para la medición del desgaste en las herramientas se utilizó un microscopio PZO-MWM con una resolución de 0.1 mm y una magnificación de 15 X. La presencia de desgaste por adhesión y difusión en la herramienta fue identificada mediante el uso de EDS. Los modelos matemáticos fueron desarrollados por medio del uso del software estadístico Minitab 14. Los resultados indicaron que la velocidad de corte es el parámetro de operación más influyente en el desgaste del flanco en la herramienta, y este comienza a aparecer a una velocidad de 500 mm/min. El porcentaje de exactitud del modelo para la velocidad de corte fue del 96%. El siguiente parámetro de operación que influyó fue el avance por diente, y por último la profundidad de corte.

Fueron evaluados por Davoodi y Eskandari (Davoodi & Eskandari, 2015), los efectos de los parámetros de corte en la vida de una herramienta de TiAlN y el volumen de material removido durante el maquinado en torno de la aleación bronce-hierro N-155. El estudio se realizó con cinco niveles de velocidades de corte y avances. La relación de entre los parámetros de corte y las variables de salida fueron modeladas utilizando el método de respuesta de superficie, se hablará un poco más de este método en el capítulo IV. El análisis de la varianza fue realizado para comprobar la adecuación del modelo matemático y sus respectivas variables. Los resultados mostraron una buena aceptación entre la medición de la herramienta y el volumen de material removido y los valores predichos por el modelo desarrollado. En adición, los insertos de corte fueron examinados mediante MEB y los mecanismos de desgaste fueron identificados a diferentes velocidades de corte, como se muestra en la figura 3.12. Se pudo observar que el desgaste por adhesión fue la falla más común en la herramienta.

Otro punto de vista con respecto a la medición del desgaste en el taladrado fue dado por Jindal (Jindal, 2012), su trabajo se centra en el análisis de la tasa de desgaste bajo diferentes condiciones utilizando el MEB. Varias condiciones

de corte con refrigerante a alta presión y sin refrigerante fueron empleadas en este trabajo. En las pruebas se obtuvo información del torque y fuerzas mediante acelerómetros colocados estratégicamente. El desgaste de la herramienta de corte fue analizado por medio del MEB en cada una de las pruebas, en las que se sometió a diferentes velocidades de corte y avances. Los resultados concluyeron que el tamaño y forma de la viruta es el factor más importante en la fluidez del proceso de taladrado. El refrigerante a alta presión demostró ser efectivo en la disminución de la temperatura y lubricación entre la viruta y la herramienta.

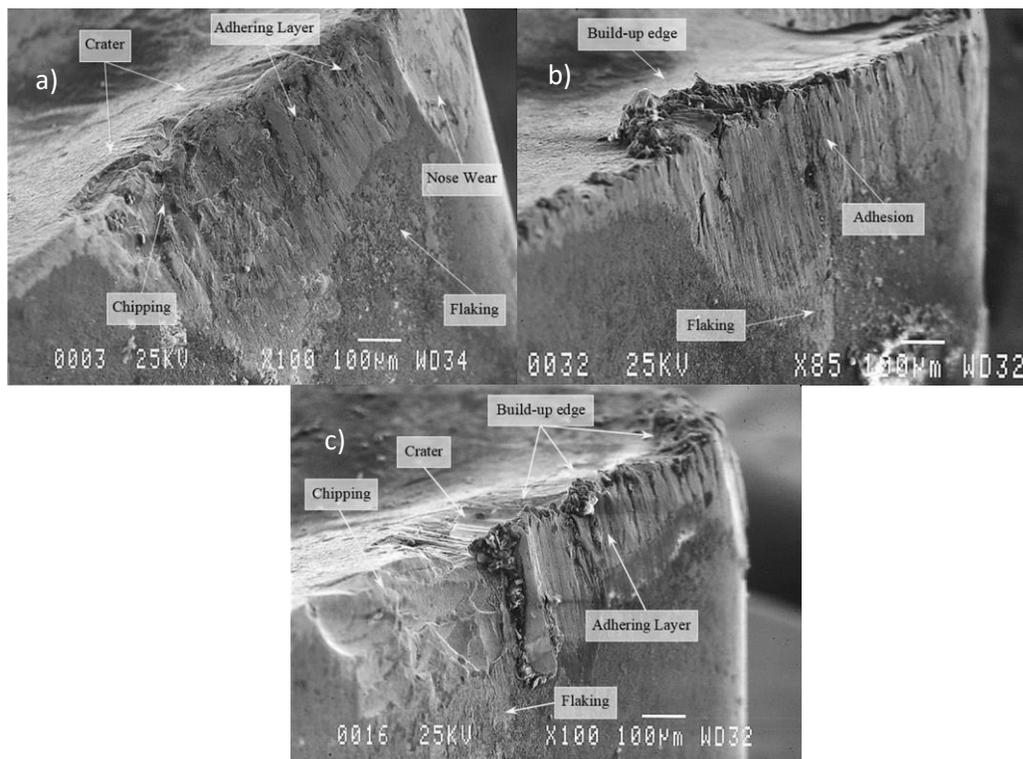


Figura 3.12 – a) Imagen MEB de la herramienta a  $V_c = 70$  m/min, b) Imagen MEB de la herramienta a  $V_c = 50$  m/min, c) Imagen MEB de la herramienta a  $V_c = 90$  m/min.  $V_c$  = velocidad de corte (Davoodi & Eskandari, 2015).

# **CAPITULO IV**

## **OPTIMIZACIÓN DE PARÁMETROS**

### **4.1 Introducción**

En los capítulos anteriores se han discutido los principios de funcionamiento de una talladora de engranajes, la cinemática, materiales y formas de los cortadores. Todo esto para poder entender el proceso de maquinado y las variables que están envueltas en el mismo.

Según la real academia de la lengua, la palabra optimización significa encontrar un método para determinar los valores de las variables que intervienen en un proceso o sistema para que el resultado sea el mejor posible.

En este capítulo se describen las distintas formas de optimizar las variables de entrada en un proceso y sus aplicaciones en la industria, y más importante aún, se definirá el método de optimización Taguchi, que es el método elegido para optimizar el desgaste de la herramienta, la rugosidad superficial, el tiempo de maquinado y la geometría en esta investigación. Este método fue diseñado por el Dr. Genechi Taguchi en la década de los años 50, con el fin de desarrollar una metodología estadística para mejorar la calidad de los productos manufacturados.

El método Taguchi será utilizado debido a que es una forma rápida, precisa y de bajo costo de optimizar procesos de manufactura.

## 4.2 Métodos de optimización

Tradicionalmente, la selección de las condiciones de corte en metal es dejada al operador. En cuyo caso, la experiencia del operador juega un rol importante, pero hasta para el operador más experimentado le es muy difícil poder obtener valores óptimos de funcionamiento. Siguiendo el trabajo de Taylor (1907) y su famosa ecuación de vida de la herramienta, diferentes enfoques experimentales y analíticos para la optimización de parámetros han sido investigados.

El principal objetivo de las operaciones de maquinado es producir productos a bajo costo y alta calidad. Por lo tanto, la economía del maquinado es una consideración importante a la hora de lograr el objetivo. El maquinado envuelve la selección óptima de parámetros de proceso como velocidades de corte y profundidades de corte ya que estas afectan directamente el costo, la productividad y la calidad de los productos (Shin & Joo, 1992). Algunas técnicas de optimización tradicionales empleadas se presentan a continuación.

Prasad et al. (1997), reportó el desarrollo de un módulo de optimización para determinar los parámetros de operación de torneado utilizando un sistema CAPP (computer-aided process planning, por sus siglas en inglés) hecho en computadora. Los materiales de las piezas consideradas en su estudio fueron acero, hierro fundido, aluminio, cobre y bronce. Los materiales de las herramientas utilizadas fueron de HSS y carburizadas. La minimización del tiempo de producción fue tomada como base para formular la función objetivo. Las restricciones en este estudio incluyen la potencia, acabado superficial, tolerancia, rigidez de la pieza, rango de las velocidades de corte, máximos y mínimos de la profundidad de corte y la profundidad de corte total. El modelo matemático fue formulado a partir de la modificación de las restricciones de tolerancia y rigidez de la pieza para las operaciones de torneado de múltiple pasadas. Los modelos formulados fueron resueltos por medio de una combinación de técnicas geométricas y programación lineal (Prasad, Rao, & Rao, 1997).

Shin y Joo (1992), presentaron un método práctico de optimizar los parámetros de maquinado bajo el criterio de costo de producción mínimo y restricciones de maquinado realistas; desarrollando un modelo matemático para este problema multivariable no lineal. Al dividir el proceso de corte en múltiples pasadas para las operaciones de acabado y desbaste, el modelo fue mejorado al ser más realista. Una estrategia práctica de reemplazo de herramienta planificada y el tiempo de inactividad de la máquina que suele ser constante, fue redefinido como una suma de términos contantes y variables. Además, varias restricciones de maquinado fueron consideradas incluyendo la restricción de acabado superficial. Para la optimización se utilizó el método convencional diferencial y el método de programación dinámica, dando como resultado a una simple y confiable solución al problema de optimización. Aunque el estudio fue desarrollado para el criterio de costo de producción mínimo, el enfoque puede ser modificado para otros criterios (Shin & Joo, 1992).

Gopalakrishnan y Kahyyal (1991), describieron el diseño y desarrollo de una herramienta analítica para la selección de parámetros de maquinado en un torno. La programación geométrica fue utilizada como metodología base para determinar los valores de velocidad de avance y velocidad de corte que pueda minimizar el costo de maquinado de un acero SAE 1045 con herramientas de carburo grado ISO P-10. El acabado superficial y la potencia fueron tomados como restricciones mientras se optimizaba la velocidad de corte y la velocidad de avance para una determinada profundidad de corte (Gopalakrishnan & Kahyyal, 1991).

Campos et al. (2013), elaboró una breve revisión de las técnicas de modelaje y optimización actuales que tienen gran influencia en aceros endurecidos. La predicción del acabado superficial, las fuerzas de corte y la vida de la herramienta en el maquinado fueron evaluadas, y se concluyó que son una tarea retardadora pero necesarias para una correcta optimización del proceso (Campos, Ferreira, de Paiva, Balestrassi, & Davim, 2013). La figura 4.1 muestra

alguna de las técnicas utilizadas por varios investigadores para la optimización de parámetros.



*Figura 4.1 – Técnicas de optimización utilizadas por varios investigadores.*

### **4.2.1 Método Taguchi y ANOVA**

El método Taguchi es una técnica de diseño de experimentos que busca reducir considerablemente el número de experimentaciones mediante el uso del arreglo ortogonal. Además, trata de minimizar los efectos de los factores de control. El análisis de la varianza o ANOVA es empleado para determinar que parámetros del proceso tienen mayor influencia. Ambos serán discutidos ampliamente en secciones posteriores.

### **4.2.2 Método de respuesta de superficie (RSM)**

El RSM, por sus siglas en inglés, es un método matemático-estadístico para determinar la relación entre varios factores y las respuestas de un proceso. El RSM es útil en el desarrollo, mejoramiento y optimización de procesos previendo una perspectiva general del sistema de respuesta.

Gaitonde et al. (2009), propuso un modelo matemático basado en RSM para analizar los efectos de los parámetros del proceso en la maquinabilidad durante el torneado de un acero alto en cromo AISI D2 utilizando insertos cerámicos. En este estudio se utilizó el diseño factorial completo para determinar la cantidad de experimentos a realizar. Del análisis paramétrico se pudo revelar que la potencia incrementa con el incremento en el avance, mientras algunas fuerzas de corte específicas decrecen. El análisis de respuesta de superficie indicó que el acabado superficial puede ser reducido a bajos valores del avance y tiempo de maquinado con altos valores de velocidad de corte, mientras que el máximo desgaste de la herramienta ocurre a la velocidad de 150 m/min para todos los valores de avance (Gaitonde, Karnik, Figueira, & Davim, 2009).

Campos et al. (2013) llegaron a la conclusión de que la metodología de respuesta de superficie presenta los criterios de optimización deseados para determinar la relación entre varios factores (velocidad de corte, profundidad de corte y avance) y las respuestas (fuerzas de corte y acabado superficial).

### **4.2.3 Algoritmo genético**

El algoritmo genético es un método de optimización basado en la evolución genética de las especies. Difiere de otras técnicas de optimización debido a sus criterios de búsqueda globales. Fue desarrollado por primera vez por Holland (Holland, 1992). Los parámetros a ser optimizados son codificados y representados por una cadena de números binarios. Estos números binarios son llamados genes y toda la cadena se llama cromosomas. Una población inicial de cromosomas es generada aleatoriamente y evaluada por la función objetivo.

Basado en los resultados de la función objetivo, los individuos de la generación actual pasan nuevamente por la misma operación hasta que se generen nuevas soluciones. El procedimiento se repite hasta que los criterios deseados sean satisfactorios.

Kishawy et al. (2011), desarrollaron un modelo para determinar el desgaste en el flanco de la herramientas de máquinas rotativas basados en la interacción geométrica de la herramienta y una función empírica. Se definieron tres constantes en el modelo desarrollado por un algoritmo genético en conjunto con varias pruebas de corte. Este algoritmo puede ser utilizado para cualquier problema de sistema multivariable. Durante las pruebas de corte y el desarrollo del modelo de desgaste del flanco, se descubrió que la velocidad de avance tiene un impacto similar a la velocidad de corte. La buena relación entre el desgaste del flanco simulado y medido indica que el modelo propuesto es efectivo (Kishawy, Pang, & Balazinski, 2011).

#### **4.2.4 Redes neuronales artificiales**

Una red neuronal artificial, de acuerdo a Haykin (Haykin, 2008) es un sistema paralelo de distribución compuesto de unidades simples de procesamiento llamadas nodos o neuronas; los nodos realizan funciones matemáticas específicas (generalmente no lineales), correspondiendo así a una forma no algorítmica de computación.

Rao et al. (Rao Venkata, Murthy, & Rao Mohan, 2014), utilizaron este método de optimización para predecir el acabado superficial, desgaste de la herramienta y las vibraciones en la pieza. El diseño propuesto fue de ocho experimentos con dos niveles de parámetros de corte como, la velocidad de corte, radio del inserto y avance. Una red neuronal (4-14-8-3) fue aplicada para aprender de los datos recolectados. La red neuronal fue entrenada por 54 ejemplos, validada por 15 ejemplos y probada por 8 ejemplos. Con el método se encontró que existe una gran relación entre los datos experimentales y valores

predichos para acabado superficial (4.51% de error), para la vibración de la pieza (4.25% de error) y para el desgaste de la herramienta (2.25% de error). Con este resultado fue posible cambiar la herramienta de corte en el momento indicado en orden para obtener una buena calidad del producto.

En las conclusiones hechas por (Campos, Ferreira, de Paiva, Balestrassi, & Davim, 2013) comenta que en general, las redes neuronales han sido bien adaptadas para la predicción precisa del acabado superficial y desgaste de la herramienta y el diagnóstico del estado de la herramienta de corte.

#### **4.2.5 Sistema adaptativo neuro difuso**

El sistema adaptativo neuro difuso es un tipo de red neuronal basado en el modelo de inferencia difuso de Takagi-Sugeno (Jang, 1993). Es una técnica efectiva para la identificación y control de sistemas no lineales complejos. Desde sus inicios a principios de los noventa, el sistema adaptativo neuro difuso ha tenido varios cambios dando origen a varias tendencias de investigación. Su principio está basado en extracción de reglas difusas en cada nivel de una red neuronal. Una vez las reglas son obtenidas proveen la información necesaria del comportamiento global de un sistema (Campos, Ferreira, de Paiva, Balestrassi, & Davim, 2013).

Lan (Lan, 2010) utilizó el sistema adaptativo neuro difuso para optimizar los parámetros de corte en un torno y así minimizar el desgaste de la herramienta. Se llevó a cabo 1 experimento de comprobación de los parámetros obtenidos por medio de esta metodología para corroborar la efectividad del modelo propuesto. A través de la experimentación de comprobación, los resultados validaron la potencia del método para predecir el desgaste de la herramienta.

Este tipo de optimización también fue utilizado para predecir el acabado superficial en un torno, utilizando insertos de carburo sobre piezas de aleación de aluminio por Sidda et. al (Sidda Reddy, Suresh Kumar, & Vijaya Kumar Reddy, 2009), Se compararon los resultado obtenidos contra el método de respuesta de

superficie, los resultados mostraron que el método adaptativo neuro difuso es superior. El RSM pudo predecir el acabado superficial con una aproximación de 84.4%; mientras que el método adaptativo neuro difuso obtuvo una aproximación de 90.25%.

#### **4.2.6 Método por elemento finito**

El método de elementos finitos (MEF, por sus siglas en español) es un método numérico general para la aproximación de soluciones de ecuaciones diferenciales y sus sistemas. El MEF se utiliza en el diseño y mejora de productos y aplicaciones industriales, así como en la simulación de sistemas físicos y biológicos complejos.

Manková et al. (Manková, Kovac, Beno, & Kundrak, 2011), investigó la influencia de los parámetros experimentales de corte sobre las fuerzas de corte, dureza del material, deformación de la viruta, temperatura y flujo de calor. Para esta investigación se utilizó acero AISI 1045 con una dureza de 55 HRC. Los resultados indicaron que el modelo propuesto se adecuó muy bien a aplicaciones prácticas sobre todo en la industria. Por su parte, Cerce et al. (Cerce, Pusavec, & Kopac, 2015), desarrollaron una manera de monitorear el desgaste de la herramienta en un torno por medio un sensor de perfiles laser. Luego estos perfiles eran ingresados a un programa de simulación por elementos finitos para observar el desgaste de la herramienta. Los resultados mostraron que este método novedoso representa un robusto y objetivo estimador del proceso de maquinado. Adicionalmente, dicha automatización de diagnóstico en la herramienta proveyó al proceso de mejor productividad y calidad de maquinado.

#### **4.3 El método Taguchi**

El diseño de experimentos (DOE, por sus siglas en inglés) es una herramienta estadística presentada por Sir R. A. Fisher en Inglaterra en la década de los 20. El objetivo principal de esta herramienta es determinar los valores

óptimos necesarios para llevar a cabo un proceso de manufactura, productivo, etc. Fisher dispuso de todas las combinaciones posibles fruto de la combinación de todas las variables presentes en el proceso. Las condiciones de dichas combinaciones fueron impuestas mediante una matriz que contiene los experimentos desarrollados entre todas las variables o factores que intervienen en el proceso. Si el número de experimentos es demasiado grande, se seleccionan aquellos experimentos más representativos en el proceso. Desde la presentación del diseño de experimentos de Fisher, Genichi Taguchi aportó una importante mejora sobre el diseño de experimentos de su antecesor. Taguchi comprobó que el DOE, no solo podía mejorar la calidad, sino reducir los costos de la producción, creando un método estandarizado que lleva su nombre y que se basa en la utilización de matrices ortogonales e introduciendo una nueva forma de analizar los resultados (Meseguer Valdenebro, 2014). El Dr. Genichi Taguchi, científico japonés, contribuyó significativamente al campo de la ingeniería de calidad. Su filosofía de calidad se basa en que la calidad debe ser designada al producto y no debe ser inspeccionada en él. Esto significa que la calidad no es lograda a través de la inspección ya que es una actividad postmortem. Su segunda filosofía nos dice que la calidad puede ser alcanzada si se minimiza la desviación del valor deseado. Y el diseño del producto debe ser tal que sea no sensitivo a factores incontrolables (ruido) (Krishnaiah & Shahabudeen, 2012).

El método Taguchi también es conocido como Diseño Robusto. El diseño robusto es un método de la ingeniería utilizado para mejorar la productividad durante actividades de investigación y desarrollo, de esta manera productos de alta calidad pueden ser desarrollados en menos tiempo y a bajo costo. Se dice que un proceso o producto es robusto si su funcionamiento no es afectado por factores de ruido. Se trata de determinar los parámetros del proceso o producto con el fin de optimizar las características funcionales y tener una mínima sensibilidad al ruido (Krishnaiah & Shahabudeen, 2012).

Taguchi fue el primero en sugerir que los experimentos estadísticamente planeados deben ser utilizados en la etapa de desarrollo del producto para

detectar factores que afecten la variabilidad de la salida denominado como efecto de dispersión de los factores. Como es importante conocer donde se ubica el efecto y la dispersión del efecto, Taguchi sugirió la combinación de las medidas de ambas variables.

$$\frac{m^2}{\sigma^2} \quad (4.2)$$

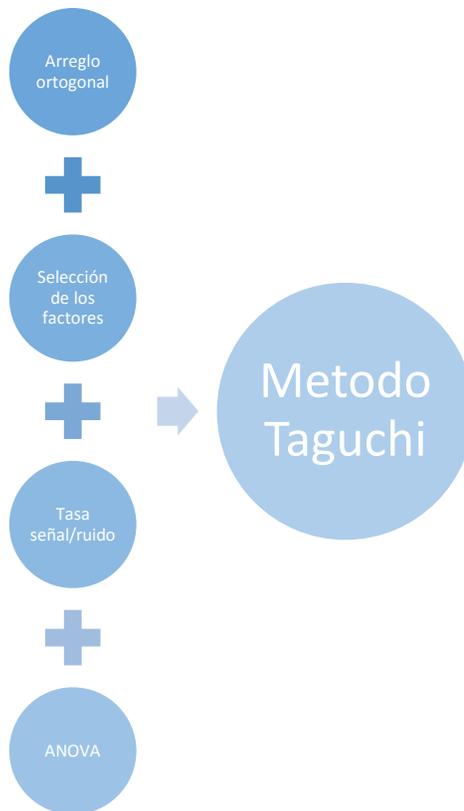
Donde,

$m^2$ , es la potencia de la señal

$\sigma^2$ , es la potencia del ruido

Los datos recolectados son transformados en tasas de señal/ruido y analizadas utilizando el análisis de la varianza (ANOVA) para luego definir los parámetros óptimos de los factores. Para el método Taguchi, optimización significa determinar los mejores niveles para los factores de control que minimicen los efectos de ruido (Krishnaiah & Shahabudeen, 2012).

En resumen, el método Taguchi o diseño robusto es una combinación de técnicas para determinar los valores óptimos de control. Estas técnicas incluyen un diseño de experimentos mediante el uso de arreglos ortogonales, elección de los factores que afectan la respuesta, las funciones objetivos son definidas por la tasa de señal/ruido y el análisis de datos se hace por medio del análisis de la varianza, todas unidas dan como resultado un paquete de optimización estadístico completo. En la figura 4.2 se muestra un cuadro de relación de técnicas del método Taguchi o diseño robusto.



*Figura 4.2 – Técnicas que componen el Método Taguchi*

### **4.3.1 Diseño de experimentos mediante el arreglo ortogonal**

El arreglo ortogonal fue una invención matemática propuesta en 1897 por Jacques Hadamard, matemático francés. Las matrices de Hadamard son matemáticamente idénticas a las matrices de Taguchi.

El Dr. Taguchi sugirió el uso del arreglo ortogonal para el diseño de experimentos, ya que permitía una gran simplicidad y fácil adaptabilidad para experimentos más complejos que implicaban varios factores con varios niveles distintos; es decir, proveen la información deseada con el mínimo número posible de experimentos y sus resultados son muy precisos. En la tabla 4.1 se muestra una comparación entre la experimentación mediante el método factorial completo y el arreglo ortogonal de Taguchi.

Tabla 4.1 – Comparación entre el método factorial completo y el arreglo ortogonal de Taguchi (Krishnaiah & Shahabudeen, 2012).

Número de factores	Número de niveles	Número de experimentos	
		Factorial completo	Taguchi
3	2	8	4
7	2	128	8
15	2	32,768	16
4	3	81	9
13	3	1,594,323	27

Dependiendo de la cantidad de niveles y factores a estudiar en cada investigación se deberá escoger un arreglo ortogonal. La tabla 4.2 muestra algunos de los arreglos ortogonales más comunes que existen. La nomenclatura de los arreglos es la siguiente  $L_a(b^c)$ , donde  $L_a$  es el número de filas que tendrá el arreglo,  $b$  es número de niveles y  $c$  es el número de columnas que tendrá el arreglo.

Tabla 4.2 – Arreglos ortogonales más comunes (Krishnaiah & Shahabudeen, 2012).

Serie de dos niveles	Serie de tres niveles	Serie de cuatro niveles	Serie de niveles mixtos
$L_4(2^3)$	$L_9(3^4)$	$L_{15}(4^5)$	$L_{18}(2^1, 3^7)$
$L_8(2^7)$	$L_{27}(3^{13})$	$L_{64}(4^{21})$	$L_{36}(2^{11}, 3^{12})$
$L_{16}(2^{15})$	$L_{81}(3^{40})$		
$L_{32}(2^{31})$			
$L_{12}(2^{11})$			

Una vez que se definieron los factores y niveles de factores, se procede a escoger el arreglo ortogonal adecuado definiendo los grados de libertad del sistema mediante la siguiente ecuación:

$$DOF = (\text{número de niveles} - 1) \times \text{número de factores} \quad (4.3)$$

Ya que definimos los grados de libertad del sistema, procedemos a encontrar la cantidad mínima de experimentos a realizar mediante la ecuación:

$$\text{Mínima cantidad experimentos} = \text{DOF} + 1 \quad (4.4)$$

A continuación se muestra un ejemplo de un arreglo ortogonal  $L_8(2^7)$  en la tabla 4.3.

*Tabla 4.3 – Ejemplo de un arreglo ortogonal – los 1's y 2's indican el nivel de los factores alto y bajo, son 8 experimentos en total, cada columna tiene la misma cantidad de 1's y 2's, este arreglo ortogonal puede ser utilizado hasta ara siete factores (Krishnaiah & Shahabudeen, 2012).*

Experimento #	Columnas						
	1	2	3	4	5	6	7
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2	2	2
3	1	2	2	1	1	2	2
4	1	2	2	2	2	1	1
5	2	1	2	1	2	1	2
6	2	1	2	2	1	2	1
7	2	2	1	1	2	2	1
8	2	2	1	2	1	1	2

### 4.3.2 Factores que afectan la respuesta

Un gran número de factores influyen en la respuesta de un producto o proceso. Estos factores pueden ser clasificados de la siguiente manera:

- Factores de control
- Factores de ruido
- Factores de señal
- Factores de escalada

Los factores de control son aquellos parámetros de proceso o diseño que se pueden controlar. El objetivo del método Taguchi consiste en identificar la configuración de factores de control que minimicen la variabilidad producida por los factores no controlables (ruido) (Meseguer Valdenebro, 2014). Los factores de control pueden ser modificados por el fabricante pero no por el consumidor o cliente del producto. Algunos ejemplos de factores de control son: las dimensiones, el material, la velocidad de corte en un torno, etc (Krishnaiah & Shahabudeen, 2012).

Los factores de ruido son aquellos en los que el fabricante no tiene ningún control, estos varían dependiendo del uso del producto y su entorno (Krishnaiah & Shahabudeen, 2012); sin embargo estos se pueden simular durante la experimentación (Meseguer Valdenebro, 2014). Los factores de ruido se clasifican en:

- Ruido externo: Producen variación desde afuera en un proceso o producto. (factores ambientales)
- Ruido interno: Producen variación desde lo interno del producto o proceso (relacionado al tiempo y función)
- Ruido del producto: Es la variación que hay entre producto y producto.

Algunos ejemplos de factores de ruido son: humedad, temperatura, variación del voltaje, material del proveedor, variación del lote, envejecimiento de la maquinaria, desgaste de la herramienta, etc. (Krishnaiah & Shahabudeen, 2012).

Los factores de señal son aquellos que afectan las magnitudes de la respuesta variable. En problemas estáticos donde la respuesta es un objetivo fijo, el factor de señal toma un valor constante. En problemas dinámicos donde la respuesta tiene un objetivo variable, el factor de señal también varía. Por ejemplo, el pedal del acelerador de un vehículo, donde la presión con la que apretamos el pedal es variable (Krishnaiah & Shahabudeen, 2012).

Los factores de escalada son factores utilizados para cambiar la media de la calidad característica para lograr alcanzar la relación funcional entre el factor de señal y la calidad característica.

### 4.3.3 Funciones objetivo en el método Taguchi

Como se mencionó en el punto 4.3 de este capítulo, la tasa de señal/ruido es una estadística que combina la media y la varianza. El objetivo del método Taguchi es el de minimizar la sensibilidad de la calidad característica a los factores de ruido. Esto es logrado seleccionando los niveles de los factores correspondientes al máximo de la tasa de señal/ruido. La tasa de señal/ruido son a menudo llamadas funciones objetivo en diseño robusto (Krishnaiah & Shahabudeen, 2012).

Existen varios tipos de tasa de señal/ruido. El tipo de tasa a utilizar depende directamente de la calidad característica que se desea obtener. Los tipos de tasa señal/ruido son los siguientes:

- Más pequeño es mejor
- Nominal es mejor
- Más grande es mejor

En la función objetivo de **más pequeño es mejor**, la calidad característica es continua y no negativa. Puede tomar cualquier valor de 0 a  $\infty$ . El valor objetivo es 0. Está representado por la siguiente función (Krishnaiah & Shahabudeen, 2012):

$$\eta = -10 \log \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i^2 \right] \quad (4.5)$$

donde,  $n$  es el número de réplicas.

Para **nominal es mejor**, la calidad característica también es continua y no negativa. Puede tomar valores de 0 a  $\infty$ . El valor objetivo no es ni 0 ni infinito. Está representado por la siguiente ecuación (Krishnaiah & Shahabudeen, 2012):

$$\eta = 10 \log \left[ \frac{Y^2}{S^2} \right] \quad (4.6)$$

donde,

$$Y = \sum_{i=1}^n \frac{Y_i}{n}$$

$$S^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(Y_i - Y)^2}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^2 - nY^2)}{n}$$

Es una optimización de dos pasos, primero se seleccionan los factores de control correspondiente a  $\eta$  máxima, que minimizan el ruido. En el segundo paso se identifican los factores de ajuste y se iguala la media al valor objetivo. Los factores de ajuste pueden ser hallados luego del análisis por ANOVA o por experiencia del departamento de ingeniería.

Por último, en la función objetivo **más grande es mejor**, la calidad característica es continua y no negativa. Puede tomar valores de 0 a  $\infty$ . Calidades características como valores de resistencia y eficiencia de combustible son ejemplos de este tipo. Está representado por la siguiente función (Krishnaiah & Shahabudeen, 2012):

$$\eta = -10 \log \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{Y_i^2} \right] \quad (4.7)$$

#### 4.3.4 Análisis de datos del diseño de experimentos

Los datos recolectados de los experimentos del arreglo ortogonal pueden ser analizados utilizando el método gráfico de respuesta y el análisis de la varianza (ANOVA) (Krishnaiah & Shahabudeen, 2012).

El método gráfico de respuesta es muy fácil de entender y aplicar. No requiere conocimiento de estadística. Para aplicaciones prácticas e industriales este método es suficiente. Por otro lado, el análisis de la varianza necesita un poco más de conocimientos estadísticos, este método cuenta la variación de todas las fuentes incluyendo el término error.

El método gráfico de respuesta se resume en unos cuantos pasos ya que a pesar de utilizarse para analizar los datos en el método Taguchi, en investigaciones de alto perfil normalmente no es comúnmente empleado. A continuación se describen brevemente (Krishnaiah & Shahabudeen, 2012):

- Paso 1: Se desarrolla una tabla con los valores totales de respuesta para los efectos de los factores.
- Paso 2: Se construye una tabla con el promedio de los valores de la respuesta y se clasifica la diferencia de nivel para cada factor.
- Paso 3: Se dibuja la gráfica de respuesta (ver figura 4.3)
- Paso 4: Se predice la condición óptima.

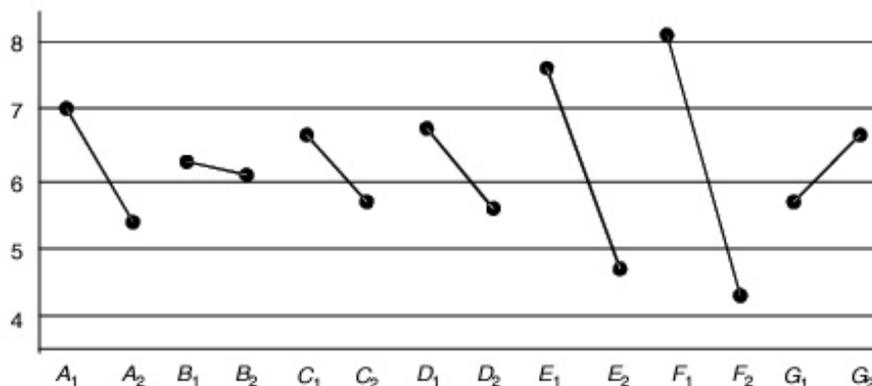


Figura 4.3 – Ilustración de una gráfica de respuesta (Krishnaiah & Shahabudeen, 2012).

#### 4.3.4.1 Análisis de la varianza (ANOVA)

El análisis de la varianza fue introducido por Sir Ronald Fisher, biólogo británico. El ANOVA es un método de partición de la variación en múltiples fuentes de variación en un experimento. Es un método estadístico utilizado para interpretar los datos experimentados y tomar decisiones acerca de los parámetros en estudio (Krishnaiah & Shahabudeen, 2012). Se utiliza para identificar y cuantificar las fuentes de las diferentes pruebas de experimentación (Athreya & Venkatesh, 2012).

El ANOVA prueba la hipótesis de que las medias de dos o más poblaciones son iguales. Los ANOVA evalúan la importancia de uno o más factores al comparar las medias de la variable de respuesta en los diferentes niveles de los factores. La hipótesis nula establece que todas las medias de la población (medias de los niveles de los factores) son iguales mientras que la hipótesis alternativa establece que al menos una es diferente (Soporte de Minitab 17, 2015).

La ecuación básica del ANOVA está dada por la suma total de los cuadrados que es igual a la suma de los cuadrados debido a los factores, sumados a la suma de los cuadrados debido al error, tal como lo describe la siguiente ecuación (Krishnaiah & Shahabudeen, 2012).

$$SS_{Total} = SS_{Factores} + SS_{Error} \quad (4.8)$$

Otro término que debe ser conocido para llevar a cabo un análisis de ANOVA son los grados de libertad. En el sentido estadístico los grados de libertad están asociados con cada pieza de información que es estimada de los datos. Por ejemplo, la media es estimada de todos los datos y requiere un grado de libertad para el propósito. Similar a la suma de los cuadrados, la misma suma puede realizarse para los grados de libertad (Krishnaiah & Shahabudeen, 2012).

$$Total_{df} = \text{grados de libertad de los factores} + \text{grado de libertad de error}$$

La varianza ( $V$ ) de cualquier factor está dada por la suma de los cuadrados dividida por sus grados de libertad. También se refiere la media cuadrada (MS).

Según Krishnaiah et al. (Krishnaiah & Shahabudeen, 2012), la prueba F se utiliza para probar si los efectos debido a los factores son significativamente diferentes o no. El valor F es calculado dividiendo la varianza del factor entre la varianza del error.

Todos estos términos se unen y se utilizan para crear la tabla de análisis de la varianza, esta tabla se utiliza para encontrar el porcentaje de influencia que tienen los parámetros sobre la respuesta, de esta manera se pueden encontrar los parámetros óptimos de un proceso o producto.

En la tabla 4.4 se muestra un resumen de todos los cálculos que se deben realizar para construir una tabla de ANOVA. Esta tabla es un ejemplo típico para el análisis de un solo factor.

Tabla 4.4 – Cálculo del análisis de la varianza (ANOVA)

Fuente de la variación	Suma de los cuadrados	Grados de libertad	Media de los cuadrados / varianza	$F_0$
Factor	$SS_F$	$K - 1$	$V_F = SS_F / K - 1$	$V_F / V_e$
Error	$SS_e$	$N - K$	$V_e = SS_e / N - K$	
Total	$SS_{Total}$	$N - 1$		

Donde,

$N$  = Número total de observaciones

$SS_F$  = Suma de los cuadrados del factor

$K$  = Número de niveles del factor

$SS_e$  = Suma de los cuadrados del error

$F_0$  = Cálculo del valor F

$V_F$  = Varianza del factor

$V_e$  = Varianza del error

El ANOVA es un método muy ventajoso debido a que la suma de los cuadrados de cada factor es tomada en cuenta, si el  $SS_e$  es grande en comparación a los factores de control en la experimentación, el análisis de la varianza en conjunto con el porcentaje de contribución sugerirá que habrá una pequeña ganancia al seleccionar las condiciones óptimas. Esta información no está disponible en las tablas de respuesta. También, este análisis indica que un error de contribución alto sugiere que algunos factores no han sido incluidos en el estudio, y por último que los resultados pueden ser estadísticamente validados.

#### **4.4 Estudios previos sobre optimización del desgaste de herramientas y parámetros de corte utilizando el método Taguchi**

Shahrom et al. (Shahrom, Yahya, & Yusoff, 2013), estudiaron los efectos de las condiciones de lubricación en la rugosidad superficial en el fresado de aluminio AISI 1060 mediante el método Taguchi. Tres parámetros de corte fueron considerados en la investigación, el avance, la profundidad de corte y la velocidad de corte. Se escogieron cuatro niveles para cada uno de los parámetros. Las condiciones de lubricación fueron: lubricación mínima, húmeda y seca. Se concluyó que la condición de lubricación mínima demostró mejor acabado superficial frente al maquinado húmedo. La relación de señal ruido y ANOVA determinó que el factor que más afecta la rugosidad superficial es el avance, seguido por la velocidad de corte y la profundidad de corte. Los cálculos de predicción de la rugosidad fueron muy cercanos a los de la validación, demostrando la precisión del método Taguchi. El porcentaje de error entre la lubricación mínima y la validación fue de 0.9%. Al demostrarse que la condición de lubricación mínima produce mejor acabado superficial se pudo lograr menores costos de producción y una reducción en la contaminación ambiental.

Yang y Tarng (Yang & Tarng, 1998), utilizaron el método Taguchi para hallar los parámetros óptimos de corte en el proceso de torneado. El arreglo

ortogonal, la relación señal ruido y el ANOVA fueron empleados para investigar las características de corte de un acero S45C utilizando herramientas de carburo de tungsteno. A través de este estudio no solo los parámetros óptimos de corte fueron obtenidos, sino también los parámetros de corte que afectan el rendimiento del proceso de torneado. Yang y Tarnng concluyen que el método Taguchi provee una metodología sistemática y eficiente para el diseño de optimización de los parámetros de corte ante otras técnicas de optimización. Los resultados demostraron que la vida de la herramienta y la rugosidad superficial pueden ser significativamente mejoradas hasta en un 250% si los parámetros óptimos propuestos por el modelo de Taguchi son aplicados en la producción.

Por su parte, Kumar y Pradhan (Kumar & Pradhan, 2013), observaron la influencia de los parámetros de corte como la velocidad de corte, avance y profundidad de corte en el desgaste del flanco de herramientas y la rugosidad superficial ( $R_a$ ) en el torneado del metal de matriz compuesto Al/SiCp, utilizando insertos de carburo de tungsteno en un entorno sin lubricación. Los experimentos fueron llevados a cabo mediante el arreglo ortogonal  $L_9$  de Taguchi. La abrasión y adhesión fueron los principales mecanismos de desgaste en las herramientas. Fallas prematuras en la herramienta por fractura o astillado no fueron evidentes. Los parámetros óptimos de corte demostraron incrementar significativamente la rugosidad superficial y el desgaste de la herramienta. Además, los modelos matemáticos desarrollados para ambas características de rendimiento demostraron ser estadísticamente significativas.

Otro ejemplo del uso de esta metodología fusionado con el análisis Grey en la optimización de parámetros de fresado en una aleación de aluminio fue desarrollado por Tsao (Tsao, 2009), este método consistió en unificar todas las respuestas en un solo coeficiente que luego pueden ser utilizados en el método Taguchi. Los resultados experimentales indicaron que los parámetros de operación óptimos pudieron ser determinados efectivamente, el desgaste del flanco logro ser reducido de 0.177 mm a 0.067 mm y la rugosidad superficial fue reducida de 0.44  $\mu\text{m}$  a 0.24  $\mu\text{m}$ . Tsao concluyó que el método Taguchi-grey es

bastante preciso para resolver problemas de optimización de desgaste de herramientas y acabados superficiales en el fresado de aleaciones de aluminio.

Qasim et al. (Qasim, Nisar, Shah , Khalid, & Sheikh, 2015), optimizaron los parámetros de maquinado de diversas herramientas. Lo hicieron por medio de la combinación de diversas herramientas incluyendo el arreglo ortogonal de Taguchi, relación de señal ruido y el ANOVA. Los parámetros de corte considerados para el estudio fueron la velocidad de corte, el avance, la profundidad de corte y el ángulo de filo en la cara de la herramienta. Los paquetes de programas informáticos utilizados, fueron ABAQUS para la simulación por elemento finito; mientras, que para el análisis estadístico se empleó Minitab. Los resultados mostraron que para disminuir las fuerzas de corte el avance y la profundidad de corte son los parámetros más importantes. Mientras, que para disminuir las temperaturas, la velocidad de corte y el ángulo del filo juegan un papel significativo. Adicional, se demostró que las herramientas de corte de carburo son mejor opción en comparación con las herramientas no recubiertas de carburo cementado en el maquinado del acero AISI 1045.

El comportamiento de dos aleaciones de acero inoxidable en el proceso de torneado fue estudiado por Selvaraj et al. (Selvaraj, Chandramohan, & Mohanraj, 2014). Las operaciones de torneado fueron llevadas a cabo con insertos recubiertos de TiC y TiCN. El diseño de experimentos adoptó el método Taguchi y fueron conducidos a 3 diferentes velocidades de corte (80,100 y 120 m/min), con 3 diferentes avances (0.04, 0.08 y 0.12 mm/rev), y una profundidad de corte constante (0.5 mm/rev). Los parámetros de corte fueron optimizados utilizando la relación de señal ruido y ANOVA. Las repuestas características obtenidas de la experimentación fueron: la rugosidad superficial, fuerzas de corte y el desgaste de la herramienta. Los resultados revelaron que el avance es el parámetro más influyente en la rugosidad superficial y las fuerzas de corte. La velocidad de corte fue el parámetro más incidente en el desgaste de la herramienta. El desgaste de la herramienta fue analizado por medio del MEB.

Los resultados predichos se encontraron bastante cerca de la comprobación experimental con un 8% de desviación.

Gupta y Kumar (Gupta & Kumar, 2015), utilizaron el método Taguchi para investigar la maquinabilidad unidireccional del compuesto de fibra de vidrio UD-GFRP en un torno. Un arreglo ortogonal  $L_{18}$  fue utilizado para 6 factores del proceso: radio del filo, ángulo del filo, avance, velocidad, condiciones de lubricación y profundidad de corte. El objetivo era modelar dos respuestas variables: rugosidad superficial y la tasa de material removido por medio de un método conocido como componente principal de análisis (CPA). El CPA es una técnica gran importancia práctica en diferentes inferencias estadísticas, cuando se hace difícil interpretar grandes números de variables independientes. Los resultados experimentales mostraron que la rugosidad superficial incrementa a medida que el avance incrementa. También, se encontró mediante el ANOVA que el avance es un factor más importante en la rugosidad que la profundidad y la velocidad de corte.

# **CAPITULO V**

## **PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL**

### **5.1 Introducción**

El objetivo de los ensayos experimentales es el de obtener los datos requeridos del proceso que indiquen un panorama amplio del estado actual, además de aportar información importante sobre el comportamiento del proceso en condiciones normales y no normales de funcionamiento. En este capítulo se especifica el equipo utilizado durante la experimentación, así como la formulación de la metodología previa a cada uno de los ensayos, el maquinado de las piezas, la programación de la máquina herramienta y las mediciones posteriores de las probetas y herramientas de corte utilizadas para este propósito. Con estos ensayos se busca la optimización del desgaste de la herramienta, utilizando el método descrito en el capítulo IV.

### **5.2 Equipos y materiales**

Para realizar el estudio de los ensayos experimentales con los que se validó el método, se requiere disponer de algunos recursos materiales. Para el proceso de maquinado se utilizó las instalaciones de la planta Daimler en SISAMEX ubicada en el municipio de Escobedo, Nuevo León. Además, la fase

de mediciones se llevó a cabo en el laboratorio de materiales de la planta de cardanes, también ubicado en SISAMEX.

### 5.2.1 Material de ensayo

El material de la pieza utilizado en los ensayos es el acero de bajo carbón DIN 25MoCr4, la composición química de este acero de bajo carbón se indica en la tabla 5.1. Este acero es utilizado en operaciones donde se lleva a cabo un endurecimiento directo de la pieza en alguna fase del proceso. Es un acero utilizado comúnmente para engranajes de todo tipo, uniones, ejes y cojinetes que serán endurecidos directamente. Las propiedades mecánicas y físicas se indican en la tabla 5.2 y 5.3 respectivamente.

*Tabla 5.1 – Composición química en % del DIN 25MoCr4 (Matweb, s.f.).*

C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	V	W	Otros
0.25	0.30	0.70	0.50	0.50	-	-	-	-

*Tabla 5.2 – Propiedades físicas del DIN 25MoCr4 a temperatura ambiente (Matweb, s.f.).*

Modulo elástico [ $10^3 \times \text{N/mm}^2$ ]	210
Densidad [ $\text{g/cm}^3$ ]	7.85

*Tabla 5.3 – Propiedades mecánicas del DIN 25MoCr4 (Matweb, s.f.).*

Dureza, Brinell	179 – 223
Dureza, Rockwell B	93
Dureza, Rockwell C	13
Dureza, Vickers	211
Coefficiente de Poisson	0.29
Maquinabilidad	60%

## 5.2.2 Centro de maquinado

El maquinado de las piezas se realizó en una talladora de engranajes CNC de 11 ejes marca Gleason-Pfauter, modelo P 200 S, ver figura 5.1. Es una talladora de engranajes que permite el maquinado interno y externo de engranajes u otras formas de perfiles igualmente espaciados en piezas cilíndricas. Las características más importantes se indican en la tabla 5.4. El sistema encargado del control numérico computarizado de la maquina herramientas es el módulo SINUMERIK 840 D, fabricado por Siemens. Este sistema permite programar el maquinado mediante el código CNC conversacional, el cual permite introducir valores a medida que el programa despliega lo que se desea maquinar, este ya viene prefabricado por el proveedor y está especialmente diseñado para el proceso de tallado de engranajes.



Figura 5.1 – Talladora de engranajes.

Tabla 5.4 – Características de la talladora de engranajes

<b>Mesa</b>	Velocidad máxima Torque máximo Diámetro de mesa Diámetro del barreno Material de la mesa	300 min <sup>-1</sup> 220 N-m 230 mm 63 mm Acero endurecido
<b>Cabezal</b>	Rango de ajuste de la carrera Rango de velocidad de carrera Diámetro del cabezal Máxima velocidad de giro	0 – 110 mm 100 – 1000 min <sup>-1</sup> 95 mm 300 min <sup>-1</sup>
<b>Lubricación</b>	Vel. de entrega al cortador Vel. de purga de la cama Capacidad del reservorio	150 L/min 20 L/min 500 L
<b>Recorridos</b>	Vel. máxima axial Vel. máxima radial	2000 mm/min 5000 mm/min
<b>Motor</b>	Motor AC	12 kW

### 5.2.3 Herramienta de ensayo

La herramienta que se utilizó para realizar los ensayos experimentales, fue el cortador para tallador de engranajes tipo disco de la marca Gleason, ver figura 5.2. Es un cortador de 68 dientes, con un diámetro de 158.75 mm en su base y un ángulo de cara de 5 °. El sustrato del que está fabricado es el G50 bajo la norma DIN o M48 HSS bajo la norma AISI, que es un acero de alta velocidad fabricado por la técnica de metalurgia de partículas de crisol, en la tabla 5.5 se indica la composición química normal de este material (Matweb, s.f.).



Figura 5.2 – Cortador tipo disco para talladora de engranajes marca Gleason.

Se puede tratar térmicamente hasta los 68 – 70 Rockwell C. Su alto contenido en carbón, vanadio y cobalto lo hace resistente a la abrasión en comparación con las herramientas de sustrato M42. En la tabla 5.6 y 5.7 se indican las propiedades físicas y mecánicas del sustrato respectivamente.

Tabla 5.5 – Composición química en % del AISI M48 (Matweb, s.f.).

C	W	Co	Cr	Mo	Fe	V	S	Otros
1.5	9.75	8.5	3.75	5.25	67.93	3.1	0.07	-

Tabla 5.6 – Propiedades físicas del AISI M48 (Matweb, s.f.).

Modulo elástico [GPa]	214
Densidad [g/cm <sup>3</sup> ]	8.255

Tabla 5.7 – Propiedades mecánicas del AISI M48 (Matweb, s.f.)

Dureza, Brinell	285 – 311
Dureza, Rockwell C @ 1165 °C	67
Dureza, Rockwell C @ 1200 °C	70
Resistencia a la flexión	2296 MPa

El cortador está recubierto de TiAlN, comercialmente llamado AlNite. En la tabla 5.8 se indican algunas características de este recubrimiento (Quezada & Mariño, 2006). Para más detalles acerca de este recubrimiento ver el capítulo III.

Tabla 5.8 – Características del recubrimiento de TiAlN (Quezada & Mariño, 2006).

Dureza, Vickers	2600 – 3000
Estabilidad de Fase	850 °C
Temperatura de oxidación	800 °C
Espesores típicos	1 – 7 µm

## 5.2.4 Equipo de limpieza

Para esta investigación se dispuso de un equipo de limpieza que se utilizó una vez que las piezas fueron maquinadas. Este sistema cuenta con mangueras para rociar un agente desengrasante biodegradable en las piezas y el cortador quitando el exceso de lubricante y rebabas que hayan quedado del proceso de maquinado. El equipo es de la marca BIOCIRCLE y el modelo es el MINI. El agente desengrasante que cae luego de rociar las partes deseadas se vuelve a recolectar por medio de una tobera, este luego pasa por un filtro de tres etapas y se puede reutilizar para limpiar otras piezas. Luego del lavado, las piezas y el cortador se someten a un soplado por aire a alta presión para eliminar el exceso del agente desengrasante y restos de metal o partículas no deseadas. Es muy importante realizar una limpieza profunda de las partes ya que permite una mejor medición y análisis de las mismas.

## 5.2.5 Microscopio estereoscópico

Para las mediciones de desgaste del flanco en los cortadores, se utilizó un microscopio estereoscópico de la marca ZEISS, modelo Discovery.V8, ver figura 5.3.

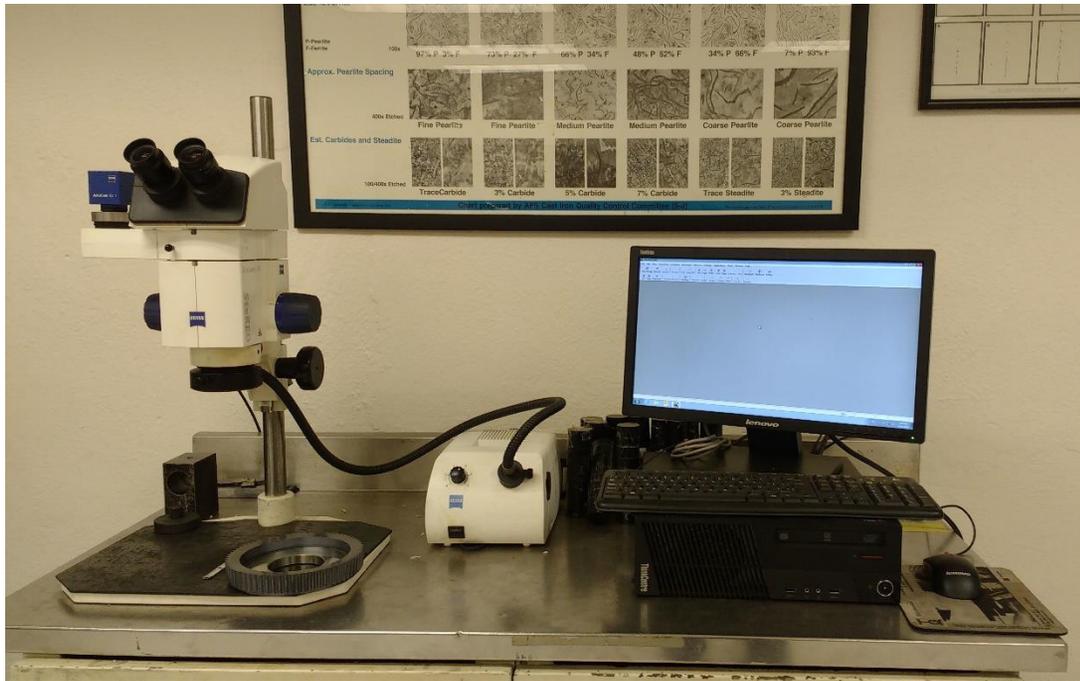


Figura 5.3 – Estereoscopio marca Zeiss.

Este estereoscopio cuenta con un máximo de 8.0 X de aumento y transmite las imágenes a una computadora por medio de una cámara adaptada marca ZEISS modelo AXIO cC1. Una vez en la computadora las imágenes pueden ser procesadas y medidas por medio del software analizador de imágenes AXIOVISION SE64.

## 5.2.6 Máquina de medición por coordenadas (MMC)

La geometría final y la rugosidad superficial son respuestas que se desean conocer, para esta medición, se hizo uso de una máquina de medición por coordenadas marca KLINGLNBERG, modelo P65, ver figura 5.4. Es un instrumento de medición directa que utiliza un palpador con movimiento en los 3

ejes, que va detectando la superficie de la pieza y envía las coordenadas a un fichero de dibujo. El objetivo de la MMC en el proceso de tallado de engranajes, es el de escanear las piezas maquinadas y verificar si su geometría y acabado superficial se mantienen dentro de los rangos especificados del diseño. Las características geométricas que se tomarán en cuenta para el estudio son la concentricidad de la pieza, perfil del engranaje y flanco del engranaje, mientras que para la rugosidad superficial es  $R_a$  y  $R_z$ .



*Figura 5.4 – Máquina de medición por coordenadas P65 (Banglong, 2014).*

### **5.2.7 Cronómetro**

Medir el tiempo de maquinado es una forma de saber que tan rápido puede ser el proceso variando los parámetros de corte, es por esta razón que para este estudio se dispuso de un cronómetro de mano, marca CASIO. El cronómetro

tiene la opción de medir el tiempo en lapsos, esto con el fin de medir varias secciones del maquinado y aun seguir llevando un tiempo global.

### 5.3 Identificación de factores de control y ruido

El procedimiento que se utilizó como base de inicio para realizar la experimentación de este estudio, es el diseño de experimentos propuesto en el método Taguchi, descrito en el capítulo IV de este estudio.

El objetivo de este estudio, es encontrar las variables que afectan el rendimiento del desgaste en la herramienta y a la vez optimizar el desgaste en la misma. Para lograr los resultados deseados en un diseño de experimentos, primero se debe identificar que variables del proceso podrían afectar el rendimiento de la herramienta. Esto se logra mediante una reunión con el personal y una lluvia de ideas. Entre estas variables se encuentran los factores de control: que son los factores del proceso que se pueden controlar. Por otro lado están los factores de ruido: que son factores que causan variabilidad en el desempeño del sistema, pero no pueden ser controlados durante la producción. Una de las razones por la que se utiliza el diseño de experimentos del método Taguchi, es porque este método permite realizar menos experimentaciones con la misma calidad de resultados que un diseño de experimentos factorial. En la tabla 5.9 se indican los factores de control y los factores de ruido.

*Tabla 5.9 – Factores de control y factores de ruido del proceso de tallado de engranajes.*

Factores de control	Factores de ruido
Velocidad de corte	Refrigerante
Avance radial inicial	Material de la herramienta
Avance radial final	Material de la pieza de trabajo
Velocidad de generación	Temperatura

Una vez ya definidas las variables más importantes del proceso, se procedió a definir los niveles de funcionamiento de cada factor, ver tabla 5.10.

Para este estudio se utilizó la matriz  $L_9 (3^4)$ , esta matriz permite tener un máximo de 3 variables con 4 niveles de factores. Los niveles de cada variable fueron fijados por la experiencia del ingeniero del proceso junto al manual del fabricante.

Tabla 5.10 – Variables y sus niveles.

Factores	Referencia	Niveles		
		1	2	3
Velocidad de corte	A	300	500	700
Avance radial inicial	B	0,01	0,014	0,02
Avance radial final	C	0,002	0,004	0,01
Avance generación	D	1,5	1,963	2

La tabla 5.10 indica las variables utilizadas durante la experimentación, cada una con 3 niveles de funcionamiento. Entre más amplios sean los rangos de los niveles, mucho mejor será el resultado, siempre y cuando estén dentro de los límites de funcionamiento de la máquina herramienta. Una vez definidas las variables y sus niveles se procede a definir la matriz de experimentos, ver tabla 5.11. Con la matriz de experimentos definida, se procede a planificar todos los detalles de la experimentación.

Tabla 5.11 – Matriz de experimentos del estudio,  $L_9 (3^4)$ .

Experimento #	A	B	C	D
1	300	0,01	0,002	1,5
2	300	0,014	0,004	1,963
3	300	0,02	0,01	2
4	500	0,01	0,004	2
5	500	0,014	0,01	1,5
6	500	0,02	0,002	1,963
7	700	0,01	0,01	1,963
8	700	0,014	0,002	2
9	700	0,02	0,004	1,5

## 5.4 Ruta de procesos de obtención de muestras

Con el fin de obtener una mayor eficiencia en la ejecución experimental, se dividió la metodología en fases, de esta manera es posible otorgar tareas a cada sección y lograr estandarizar la forma en que se realiza cada ensayo. El diagrama de flujo (ver figura 5.5) muestra las etapas que forman la metodología experimental.

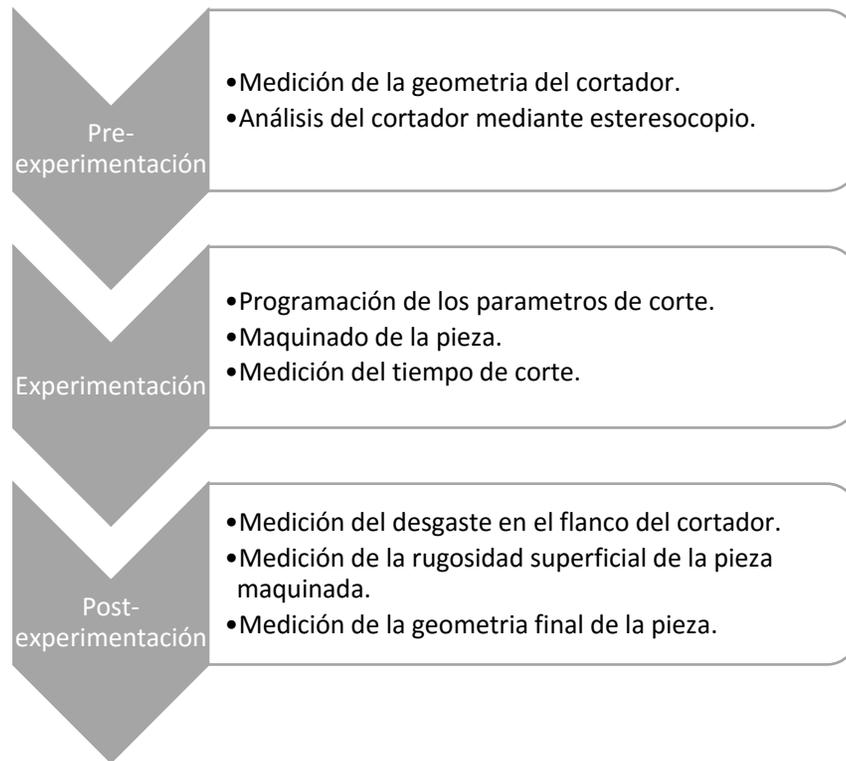


Figura 5.5 – Diagrama de flujo del método experimental.

El método experimental esquematizado en la figura 5.5 está formado por tres fases. La fase de pre-experimentación es donde se realizaron las mediciones previas del cortador, esta información proporcionó el estado inicial de la herramienta. Luego, se procedió a realizar la fase de experimentación, en esta fase se formalizó la programación y maquinado de las piezas. Por último, está la fase de post-experimentación, que es donde se recolectaron todos los datos y respuestas para el estudio. Este esquema se repite una y otra vez hasta que

todos los experimentos fueron completados. En los siguientes puntos se detallan cada una de las fases.

### 5.4.1 Pre-experimentación

La fase de pre-experimentación fue donde se realizaron las mediciones iniciales de la geometría del cortador, de manera que se pudiera tener referencia de cómo se encontraba éste previo al maquinado. Para esto, primero se seleccionó el cortador que se utilizaría en cada una de las experimentaciones, el cual fue suministrado por el departamento de mantenimiento. Luego se procedió a validar su estado mediante el estereoscopio, ver figura 5.6.



*Figura 5.6 – Uso del estereoscopio para referenciación de un cortador sin utilizar.*

Una vez se registraron las imágenes del cortador sin utilizar para su referenciación, se procedió con la medición del diámetro y la altura del cortador, como lo muestra la figura 5.7, mediante el uso de un pie de rey para medir el diámetro y un reloj de caratula para medir la altura. Estas medidas se utilizaron

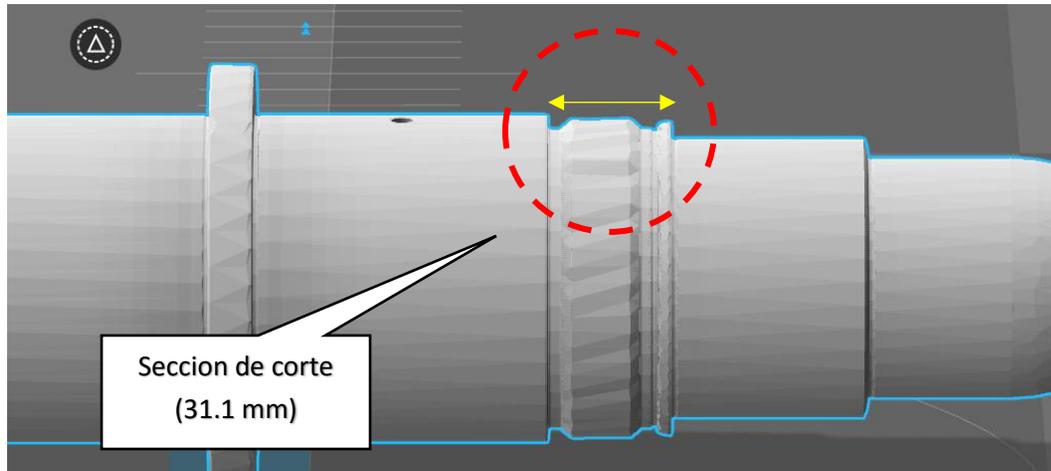
posteriormente en la fase de experimentación, para la programación del código CNC en la talladora de engranajes.



Figura 5.7 – Medición de la altura de un cortador por medio de un reloj de caratula.

#### 5.4.2 Proceso de maquinado

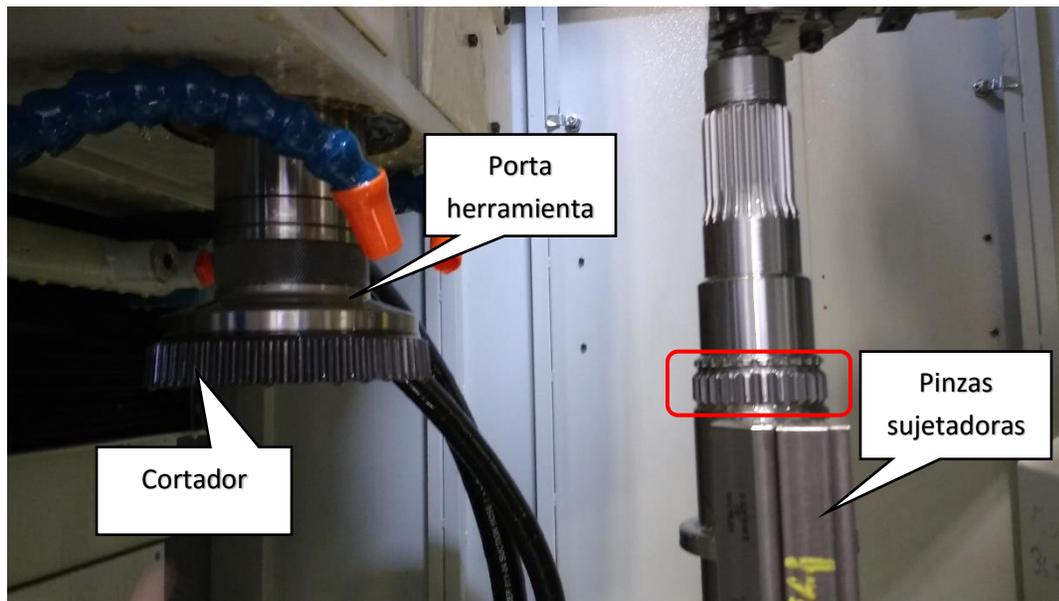
En esta etapa se realizó el maquinado de cada una de las muestras especímenes propuestas en el diseño de experimentos. El primer paso de esta fase fue, obtener la probeta en la que se realizó el ensayo, las probetas de prueba son flechas de transmisión cilíndricas y la sección donde se realizó el corte tiene una dimensión de 31.1 mm de longitud, ver figura 5.8.



*Figura 5.8 – Sección de corte en la probeta de ensayo.*

La probeta es colocada dentro de la talladora de engranajes donde unas pinzas hidráulicas la sujetan para que no tenga movimiento durante el maquinado, una vez hecho esto, se instaló el cortador en el porta herramienta, el cual se sujeta al husillo principal de la talladora de engranajes, ver figura 5.9. Luego, se procedió con la programación de los parámetros de corte propuestos en el diseño de experimentos, esto se hizo directamente en el control principal del sistema CNC. Con la herramienta y el cortador ya colocados en la máquina y la programación del código CNC, continúa el maquinado de la probeta, este consistió en hacer pasar la herramienta de corte en un movimiento vertical de vaivén a lo largo de los 31.1 mm de longitud, hasta lograr una penetración de corte de 2.65 mm. Los parámetros de operación seleccionados en el proceso son: la velocidad de corte, el avance radial inicial, el avance radial final y la velocidad de generación. Es por esta razón que los ensayos de experimentación se realizaron ajustando las variables en un rango amplio de funcionamiento, para descubrir cuál de ellos tiene mayor incidencia en el desgaste de la herramienta y las demás variables. La velocidad de corte utilizada durante los experimentos fueron 300, 500 y 700 golpes por minuto, para el avance radial inicial se utilizó 0.01, 0.014 y 0.02 mm/golpe, en el avance radial final fue 0.002, 0.004 y 0.01

mm/golpe, y por último la velocidad de generación fue configurada a 1.5, 1.963 y 2.0 mm/golpe.



*Figura 5.9 – Arreglo cortador pieza dentro de la talladora de engranajes, en el cuadro en rojo se muestra el engranaje maquinado.*

Al mismo tiempo que se está realizando el maquinado, por medio de un cronometro de mano y con la ayuda de la pantalla de control numérico se registró el tiempo de maquinado de la pieza, con el fin de evaluar que otros parámetros de corte influyen en la velocidad del proceso. Una vez terminado el maquinado, se baja la pieza y el porta herramienta, se desmonta el cortador del mismo, y por ultimo son llevados a la estación de limpieza donde se eliminó el exceso de lubricante y rebabas generadas en el maquinado.

### **5.4.3 Post- experimentación**

La fase de post-experimentación es una de las fases más importantes en el estudio, ya que es en esta donde se obtienen todos los datos. Una vez el cortador y la pieza fueron limpiados, la geometría y la rugosidad de la pieza

maquinada fueron medidas por medio de la MMC, como se mencionó anteriormente.

Para la obtención de los valores de **geometría y la rugosidad superficial**, se utilizó la MMC, ver figura 5.10, se colocó la pieza en posición vertical sobre la mesa de medición donde dos contrapuntos se encargan de sujetarla. La pieza debe estar completamente limpia y libre de partículas como hebras de tela, viruta, etc. para la medición. Una vez la pieza está en posición, el software de la MMC es configurado para medir el engranaje. Mediante un palpador magnético, la rugosidad superficial  $R_a$  y  $R_z$ , el perfil derecho e izquierdo y el flanco derecho e izquierdo del engranaje fueron detectados y comparados digitalmente versus las dimensiones originales del cliente. La MMC mide en varios dientes y secciones del engranaje a fin de obtener mediciones altamente precisas. Una vez el palpador terminó la exploración en el engranaje, la MMC genera un reporte impreso. Si las dimensiones están fuera de lo permisible por el modelo original, el reporte indica por medio de letras en negrita que hubo una anomalía en la medición.

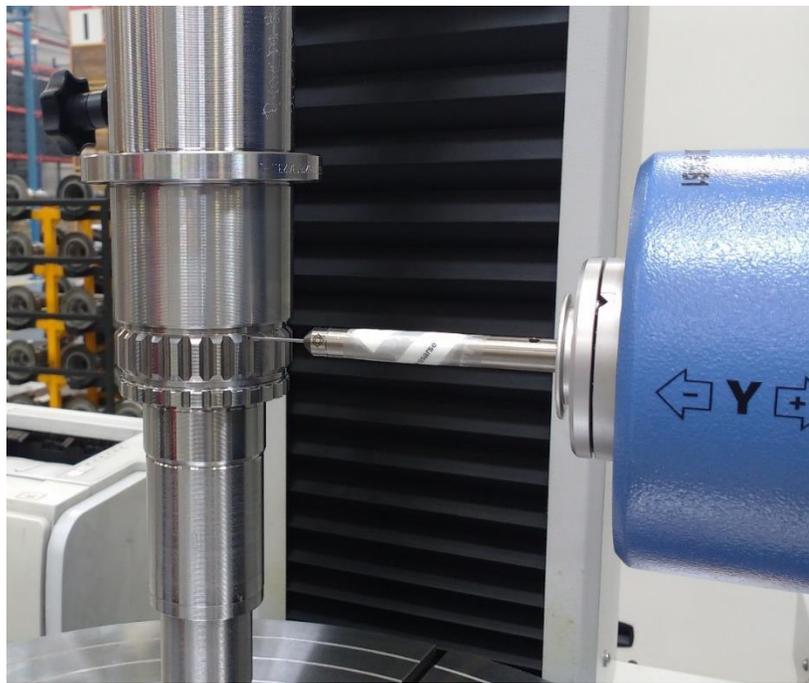
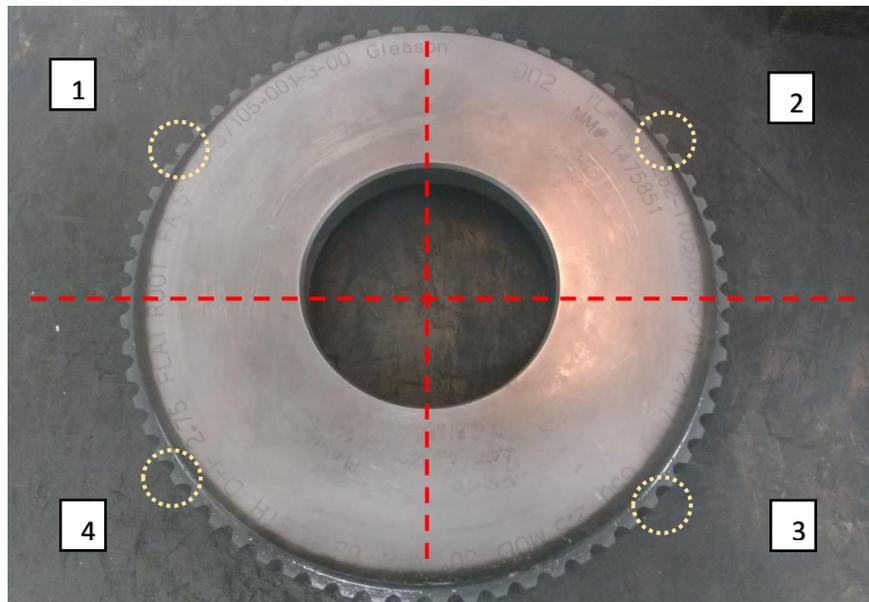


Figura 5.10 – Medición de la geometría por medio de la MMC.

Ya que todas las mediciones de la pieza han sido realizadas, se procede con la medición del **desgaste del flanco** en el cortador. Estas mediciones se realizan para tener un valor comparativo del desgaste de flanco sufrido en las herramientas y poder determinar cuál de ellas tiene un desgaste mayor o se desgasta más rápidamente. Para la obtención de este dato se utiliza el microscopio estereoscópico y el software analizador de imágenes Axiovision.

Para medir el desgaste del flanco, se colocó la herramienta en el estereoscopio, se ajustó la cantidad y orientación correcta de luz, con el fin de poder observar el desgaste. Como el cortador es circular, las mediciones se realizaron en 4 secciones y en cada una de las secciones se obtuvo la imagen de un diente, ver figura 5.11, con el fin de poder ver si hay reciprocidad en el comportamiento del desgaste en todo el cortador.



*Figura 5.11 – Secciones de medición del cortador mediante el estereoscopio.*

Las imágenes fueron capturadas por medio de una cámara colocada en el estereoscopio con un aumento constante de 8.0 X. Cuidando que la herramienta no se mueva durante la adquisición de la imagen, la cámara debe enfocar perfectamente la zona a medir, ver figura 5.12, además se debe cuidar el brillo excesivo en el área de estudio. La configuración de la altura del lente del

estereoscopio y posición de la herramienta debe ser la misma para todas las mediciones restantes, para compensar posibles errores.

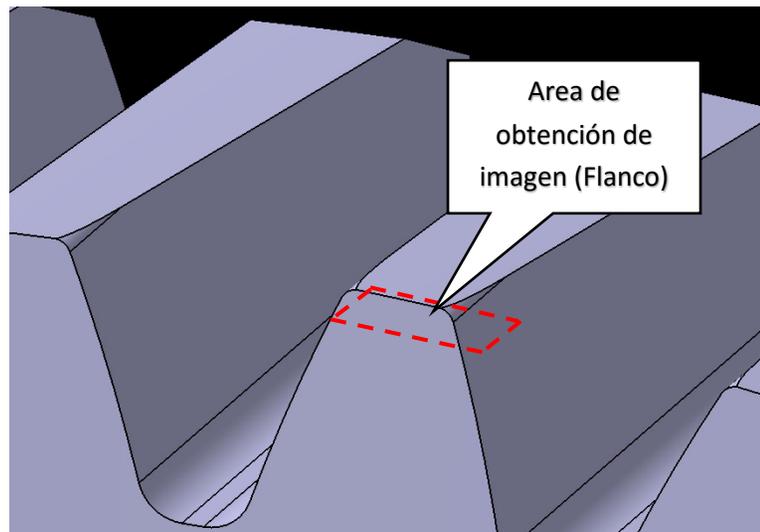


Figura 5.12 – Área de obtención de imágenes mediante el estereoscopio.

Luego que las imágenes son capturadas, se procedió a realizar el análisis y medición por medio del software Axiovision. La obtención del valor del desgaste se hizo lo más cerca al filo de corte de la herramienta, en algunas imágenes se pudo apreciar mucho más el desgaste y en otras imágenes no fue tan visible, pero con un correcto ángulo de incidencia de la luz es perceptible ver figura 5.13. El software convierte la información en pixeles recibida por parte de la cámara a medidas reales, en este caso  $\mu\text{m}$  y luego fue documentada para su análisis estadístico.

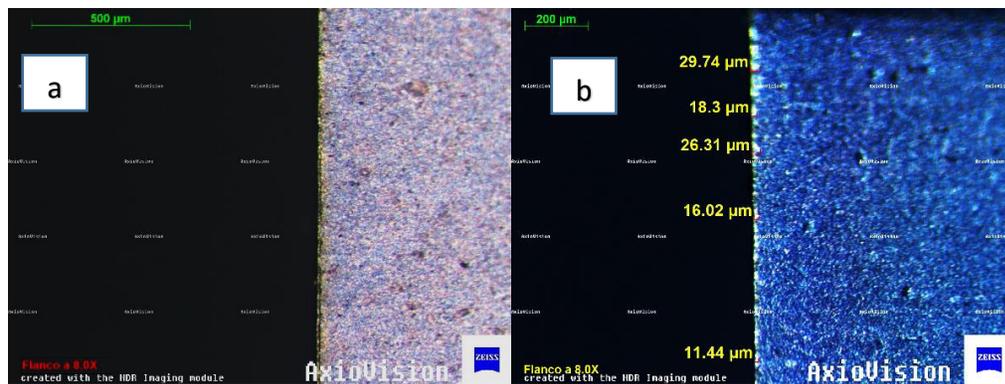


Figura 5.13 – a) cortador sin utilizar a 8.0X; b) imagen de cortador ya utilizado a 8.0 X.

# **CAPITULO VI**

## **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### **6.1 Introducción**

Este capítulo condensa los resultados obtenidos en los ensayos experimentales, como también el análisis de cada uno de ellos que llevan a comprender más el objetivo de este estudio.

Los resultados corresponden a las 9 experimentaciones propuestas en el apartado 5.3 del capítulo V. Estos, no son más que las variables dependientes resultantes del proceso de maquinado, que permiten concluir cuales son los parámetros o variables que inciden directamente en el desgaste y otras características que se discutirán posteriormente en este capítulo.

### **6.2 Medición del desgaste en el flanco**

A continuación se muestran los resultados obtenidos por medio del estereoscopio y el software de análisis de imágenes Axiovision. Esta respuesta se obtiene realizando un barrido de búsqueda del desgaste entre dientes del cortador, una vez identificado el desgaste en los dientes, se procedió a medir la longitud del desgaste en cada uno de ellos. Posteriormente, se calculó el promedio del desgaste para cada diente, así como el promedio del conjunto de

dientes del cortador. Dando como resultado el desgaste promedio y el desgaste máximo promedio de cada cortador.

Un condensado de las medidas tomadas en cada uno de los ensayos experimentales se muestra en la tabla 6.1, donde la primera columna corresponde al número de experimento, las siguientes 4 columnas indican los parámetros de funcionamiento de cada experimento y las 2 últimas columnas muestran los resultados del desgaste de herramienta obtenido de las pruebas de maquinado.

*Tabla 6.1 – Resultados de las mediciones del desgaste.*

Exp #	Velocidad de corte (golpe/min)	Avance radial inicial (mm/golpe)	Avance radial final (mm/golpe)	Velocidad de generación (mm/golpe)	FW Total (µm)	FW Max. total (µm)
1	300	0.010	0.002	1.50	28.84	45.75
2	300	0.014	0.004	1.963	22.65	33.86
3	300	0.020	0.01	2.00	23.64	43.90
4	500	0.010	0.004	2.00	37.24	55.89
5	500	0.014	0.01	1.50	32.15	50.45
6	500	0.020	0.002	1.963	33.82	50.84
7	700	0.010	0.01	1.963	37.95	59.87
8	700	0.014	0.002	2.00	43.57	71.05
9	700	0.020	0.004	1.50	40.07	59.36

El desgaste más severo se obtuvo en la prueba #8, realizada con una velocidad de corte de 700 golpes/min, un avance radial inicial de 0.014 mm/golpe, un avance radial final de 0.002 mm/golpe y una velocidad de generación de 2.00 mm/golpe, dando como resultado un desgaste promedio de 43.57 µm y un desgaste máximo promedio de 71.05 µm, como se observa en la tabla 6.2, por lo contrario, el mínimo desgaste registrado fue el efecto de la prueba #2, con una velocidad de 300 golpes/min, un avance radial inicial de 0.014 mm/golpe, un avance radial final de 0.004 mm/golpe y 1.963 mm/golpe, dando como resultado

un desgaste promedio de 22.65  $\mu\text{m}$  y un desgaste máximo promedio de 33.86  $\mu\text{m}$ , como se muestra en la tabla 6.3. En el anexo I se muestran las tablas correspondientes a los experimentos restantes.

Tabla 6.2 – Medición del desgaste del flanco en el experimento #8.

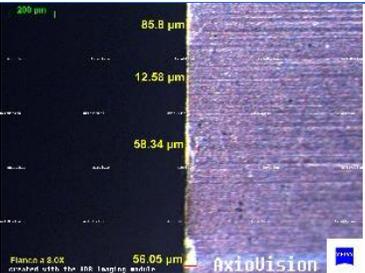
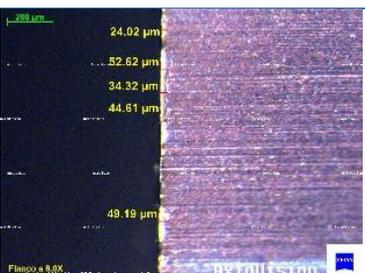
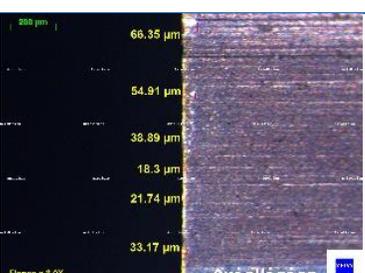
Desgaste promedio	Desgaste máximo	Diente	Imagen
42.6769	58.34	1	
48.0445	85.80	2	
39.7516	53.77	3	
37.0630	66.35	4	
<b>Desgaste promedio total</b>	<b>43.57</b>	<b>Desgaste máximo promedio</b>	<b>71.05</b>

Tabla 6.3 – Medición del desgaste del flanco en el experimento #2.

Desgaste promedio	Desgaste máximo	Diente	Imagen
21.86	26.31	1	
20.26	26.31	2	
20.30	29.74	3	
27.94	59.49	4	
<b>Desgaste promedio total</b>	<b>22.65</b>	<b>Desgaste máximo promedio</b>	<b>33.86</b>

Los resultados obtenidos sugieren que a medida que la velocidad de corte aumenta, el desgaste de la herramienta también tiende a aumentar, tanto para el desgaste total como para el desgaste máximo. Esto indica que la velocidad de

corte tiene mucha incidencia sobre el desgaste. También, se observa que los resultados de desgaste más altos se registraron en las pruebas que se realizaron a 700 golpes/min, lo que confirma una vez más que la velocidad de corte es un parámetro muy importante a tomar en cuenta en el desgaste de la herramienta. La figura 6.1 muestra un histograma de los resultados del desgaste de la herramienta a medida que aumenta la velocidad de corte a lo largo de los 9 experimentos.

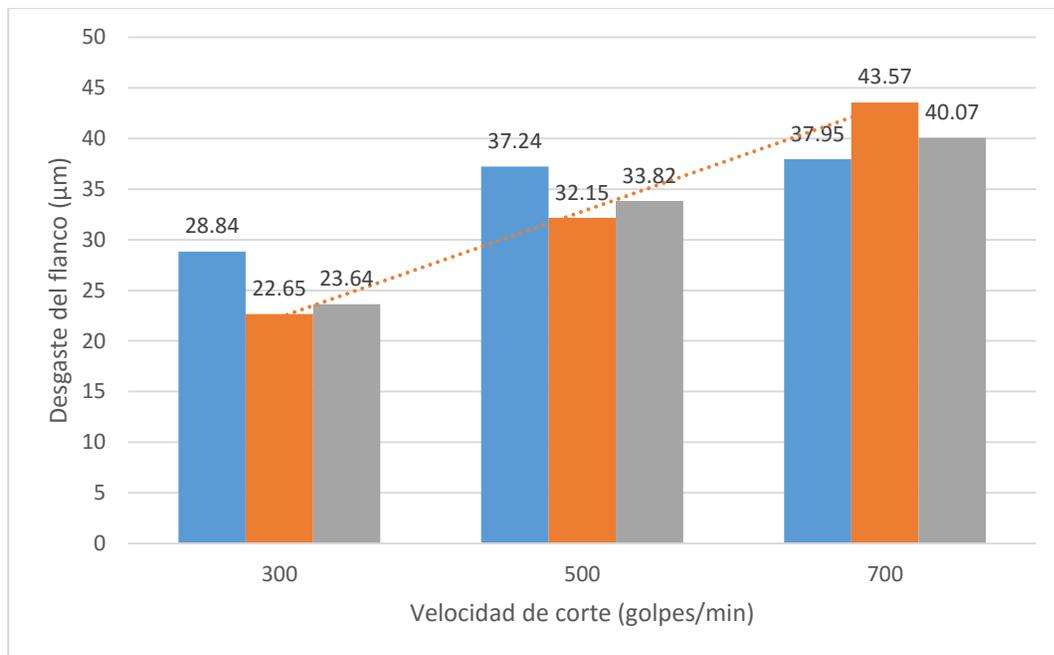


Figura 6.1 – Histograma del incremento del desgaste vs la velocidad de corte.

En los experimentos 1, 4, 7 y 8 se observó áreas de los dientes del cortador con gran desprendimiento de material y craterización en los hombros del mismo, como se muestra en la figura 6.2. Adicional, en muchas de las pruebas el comportamiento del desgaste a lo largo del diente no es uniforme sino que tiende a ser alto en el inicio del diente, se torna estable en el medio y vuelve a aumentar al final del diente pero con una menor magnitud, como se muestra en la figura 6.3.

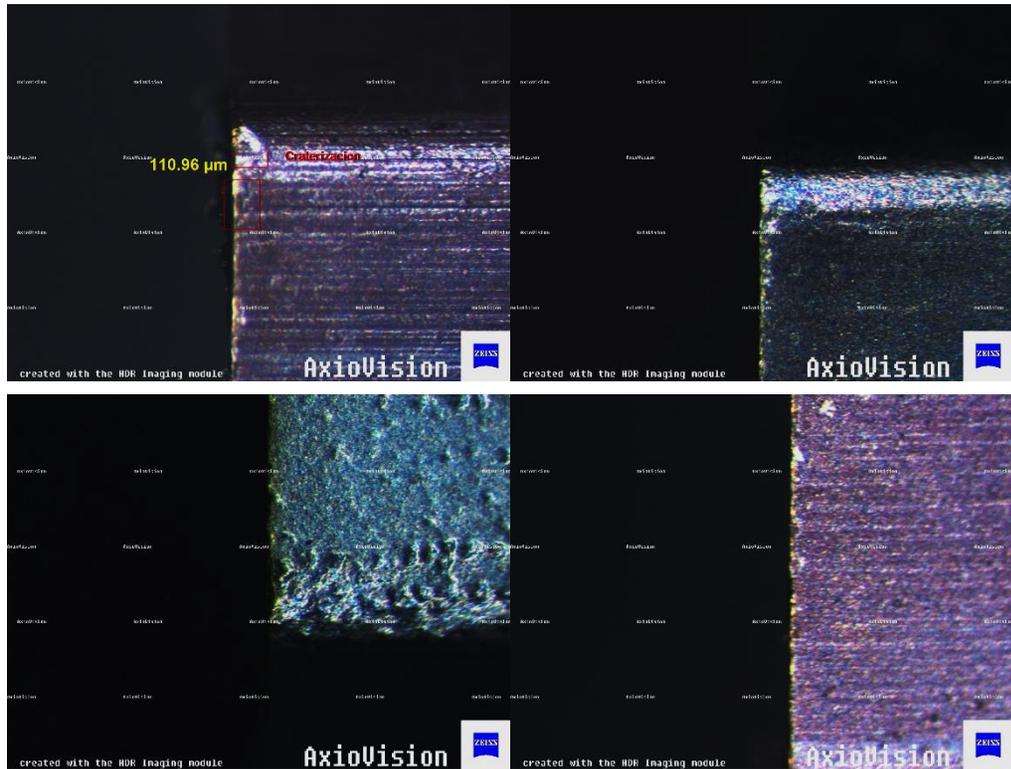


Figura 6.2 – a) Craterización en el experimento #1, b) Craterización en el experimento #4, c) Craterización en el experimento #7 y d) Craterización en el experimento #8.

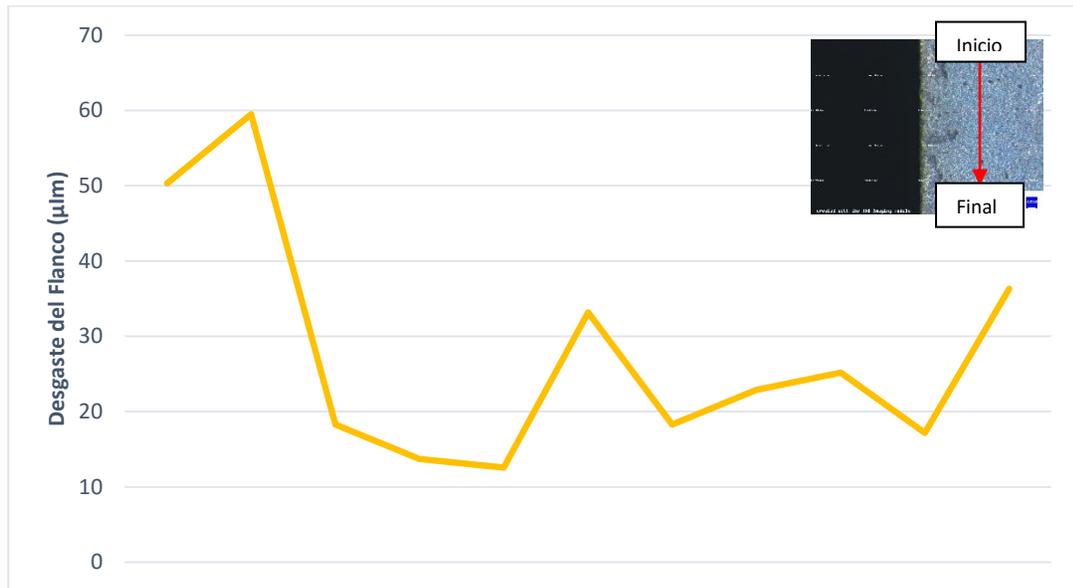


Figura 6.3 – Comportamiento del desgaste en el diente del cortador.

### 6.3 Medición de la rugosidad superficial $R_a$ y $R_z$

La rugosidad superficial se obtuvo de la medición del palpador rugosímetro de la MMC, a través de una longitud de 1.5 mm del perfil del diente de las piezas talladas en cada una de las experimentaciones. Los resultados condensados correspondientes a la rugosidad superficial  $R_a$  y  $R_z$  son presentados en la tabla 6.4:

Tabla 6.4 – Resultados de la rugosidad superficial.

Exp #	Velocidad de corte (golpe/min)	Avance radial inicial (mm/golpe)	Avance radial final (mm/golpe)	Velocidad de generación (mm/golpe)	$R_a$ RH ( $\mu\text{m}$ )	$R_z$ RH ( $\mu\text{m}$ )
1	300	0.010	0.002	1.50	3.97	12.66
2	300	0.014	0.004	1.963	4.55	13.82
3	300	0.020	0.01	2.00	3.91	12.53
4	500	0.010	0.004	2.00	5.08	13.01
5	500	0.014	0.01	1.50	3.95	11.52
6	500	0.020	0.002	1.963	4.63	12.22
7	700	0.010	0.01	1.963	4.51	11.73
8	700	0.014	0.002	2.00	3.69	11.88
9	700	0.020	0.004	1.50	4.37	13.17

Las mediciones de rugosidad superficial, tanto  $R_a$  como  $R_z$ , indican un incremento en las pruebas realizadas con un avance radial final de 0.004 mm/golpe, como se observa en las gráficas de las figuras 6.4 y 6.5.

Las pruebas realizadas a velocidades de corte de 700 golpes/min se mantuvieron con bajos resultados de rugosidad superficial  $R_a$  y  $R_z$ . Esto indica que para minimizar la rugosidad superficial se debe evitar trabajar cerca de un avance radial final de 0.004 mm/golpe, preferiblemente próximo a un avance radial final de 0.010 mm/golpe y aumentar la velocidad de corte a rangos de funcionamiento cercanos a los 700 golpes/min.

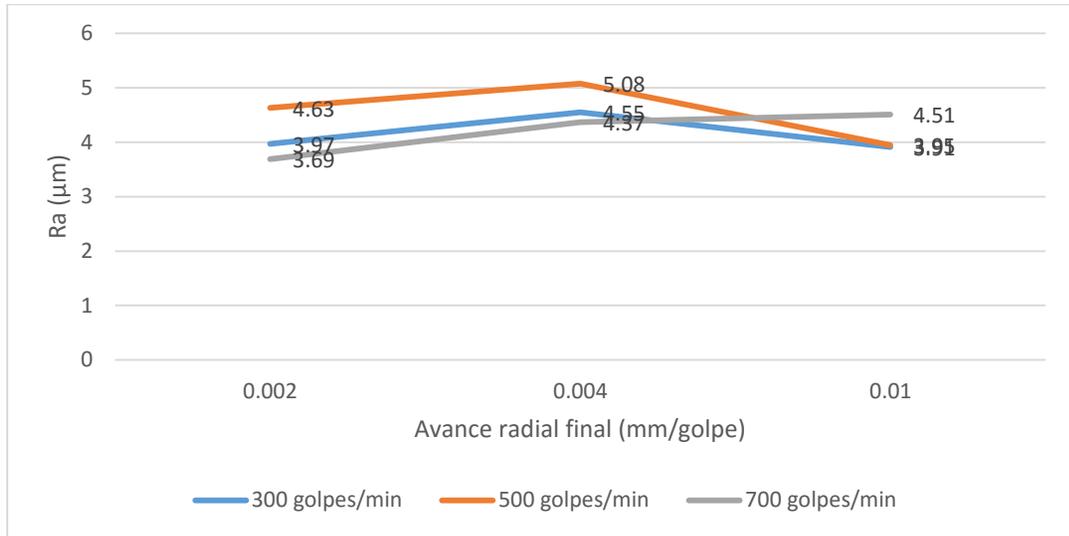


Figura 6.4 – Rugosidad superficial Ra vs avance radial final.

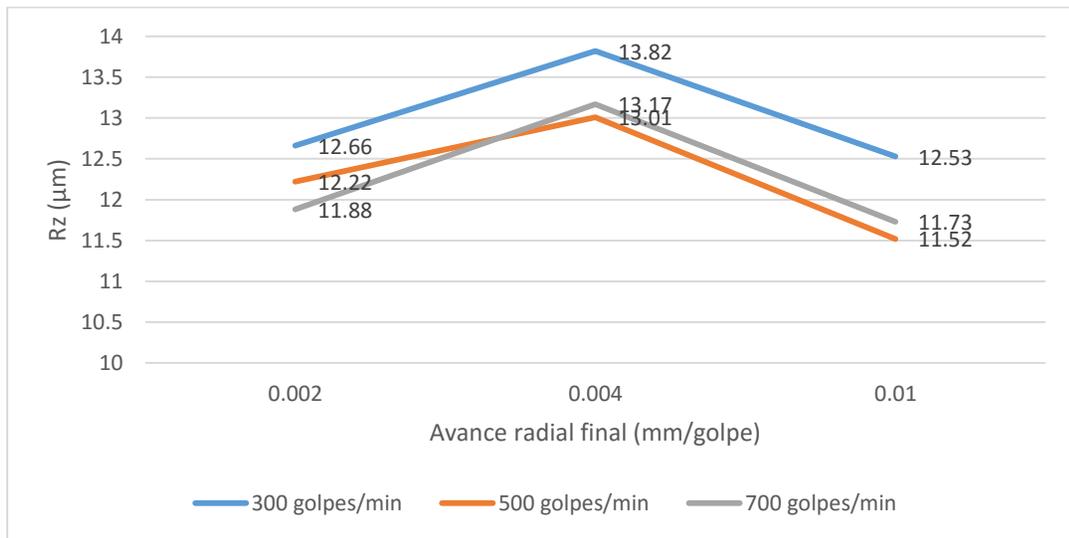


Figura 6.5 – Rugosidad superficial Rz vs avance radial final.

## 6.4 Medición del tiempo de maquinado

Con el fin de conocer que combinación de parámetros es la más eficiente en tiempos de maquinado, se cronometró cada experimentación, los resultados se muestran en la tabla 6.5:

Tabla 6.5 – Resultados de la medición del tiempo de maquinado.

Exp #	Velocidad de corte (golpe/min)	Avance radial inicial (mm/golpe)	Avance radial final (mm/golpe)	Velocidad de generación (mm/golpe)	Tiempo de ciclo (seg)	Tiempo de ciclo (min)
1	300	0.010	0.002	1.50	203	3' 23"
2	300	0.014	0.004	1.963	123	2' 03"
3	300	0.020	0.01	2.00	93	1' 33"
4	500	0.010	0.004	2.00	90	1' 30"
5	500	0.014	0.01	1.50	67	1' 07"
6	500	0.020	0.002	1.963	88	1' 28"
7	700	0.010	0.01	1.963	46	0' 46"
8	700	0.014	0.002	2.00	66	1' 06"
9	700	0.020	0.004	1.50	57	0' 57"

Se puede apreciar que en los experimentos donde las velocidades de corte y el avance radial son más altos, también los tiempos tienden a ser más rápidos, como lo muestra lo muestra la gráfica de la figura 6.6. Esto sugiere que la velocidad de generación y el avance radial inicial no juegan un papel tan importante en la velocidad de maquinado, esto podrá ser ratificado con el ANOVA en un análisis posterior.

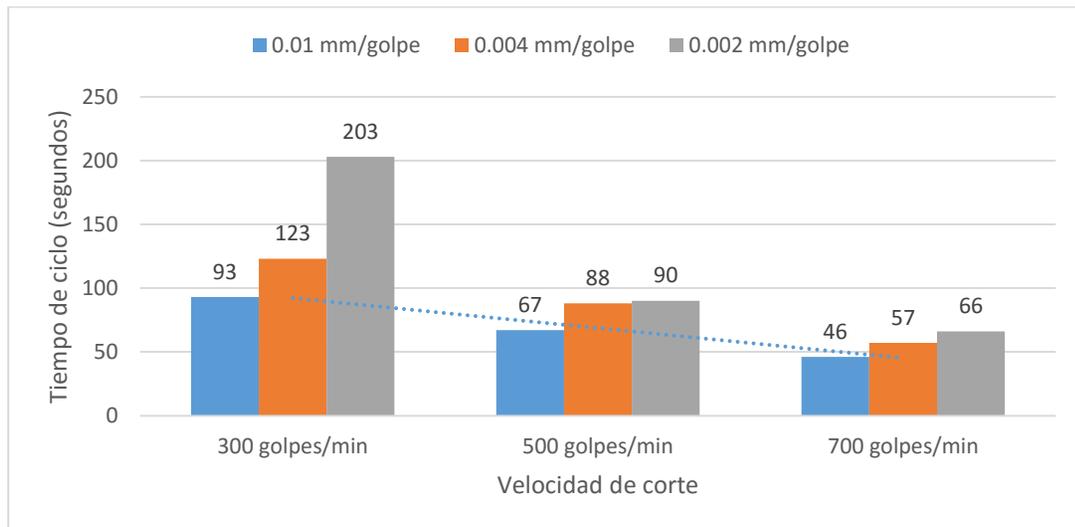
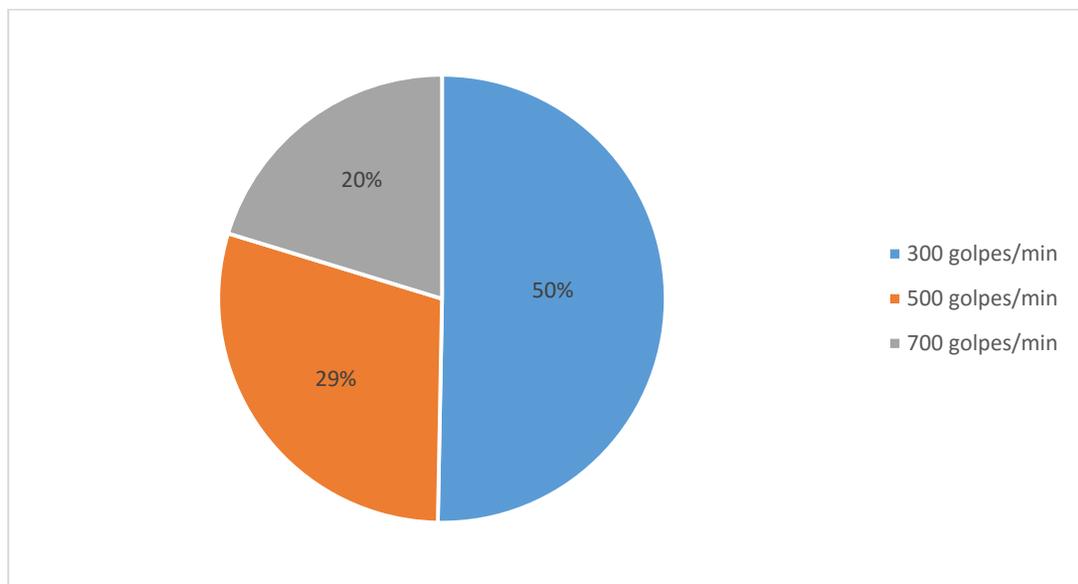


Figura 6.6 – Velocidad de corte vs tiempo de maquinado.

Observado la figura 6.6 que indica las velocidades de corte vs el tiempo de maquinado, se puede observar que a medida que la velocidad de corte

aumenta, el tiempo de maquinado disminuye, se puede ver como la tendencia va en declive. También, se percibe como las barras tienen un comportamiento de escalera hacia la derecha, que indica que a medida que disminuye el avance radial final, el tiempo de maquinado aumenta.

La figura 6.7 muestra un gráfico de anillos con los valores en porcentajes del tiempo acumulado total del juego de cada una de las velocidades de corte, resultando la velocidad de 300 golpes/min la más lenta con un 50%, 500 golpes/min con un 29% y la más rápida 700 golpes/min con 20%.



*Figura 6.7 – Acumulado del tiempo entre velocidades.*

## 6.5 Medición de la geometría de la pieza

Los resultados correspondientes a la geometría de la pieza son obtenidos mediante la MMC, deslizando un palpador a lo largo del perfil izquierdo y derecho del engranaje maquinado. Los resultados deben oscilar en un rango de valores de  $-35 \mu\text{m}$  a  $35 \mu\text{m}$ . Un valor excedente a este rango da como resultado una geometría inaceptable, lo ideal es que el valor esté lo más cerca de 0.

Un condensado de las medidas tomadas en cada uno de los ensayos experimentales se muestra en la tabla 6.6, donde la primera columna muestra el

número de experimento, las siguientes 4 columnas muestran los parámetros de funcionamiento de cada experimento y las 2 últimas columnas muestran los resultados del perfil del engranaje obtenido de las pruebas de maquinado.

Tabla 6.6 – Resultados de la medición de las geometrías del engranaje.

Exp #	Velocidad de corte (golpe/min)	Avance radial inicial (mm/golpe)	Avance radial final (mm/golpe)	Velocidad de generación (mm/golpe)	fHam LH ( $\mu\text{m}$ )	fHam RH ( $\mu\text{m}$ )
1	300	0.010	0.002	1.50	-6.90	-6.80
2	300	0.014	0.004	1.963	-4.00	-16.70
3	300	0.020	0.01	2.00	-16.10	-15.90
4	500	0.010	0.004	2.00	-9.60	-12.30
5	500	0.014	0.01	1.50	-3.10	-5.80
6	500	0.020	0.002	1.963	-9.20	-7.20
7	700	0.010	0.01	1.963	-3.90	-1.30
8	700	0.014	0.002	2.00	-7.50	-8.70
9	700	0.020	0.004	1.50	-8.80	-10.20

El perfil de engranaje máximo fue alcanzado por la prueba experimental #3, dando como resultado un perfil promedio izquierdo de  $-16.10 \mu\text{m}$  y para el perfil promedio derecho  $-15.90 \mu\text{m}$ , como lo muestra el reporte en la figura 6.8.

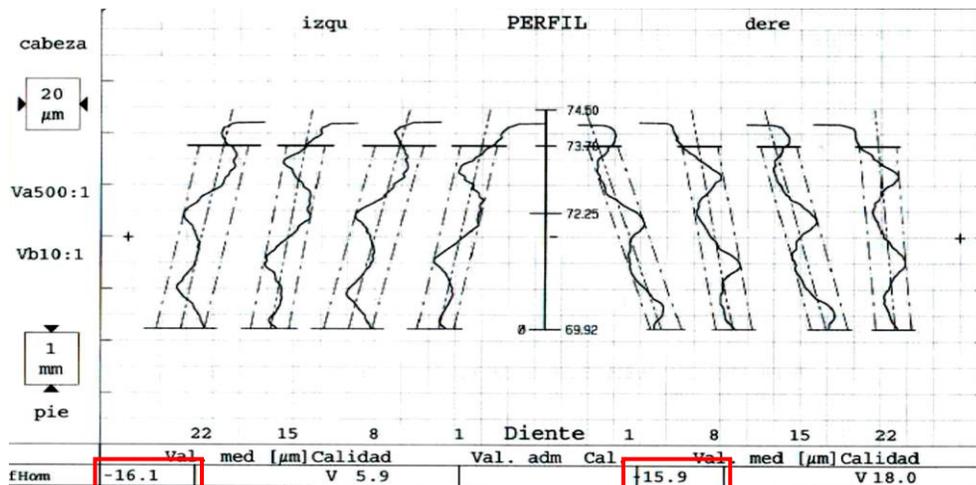


Figura 6.8 – Resultado de la geometría en la experimentación #3.

Por el contrario, el perfil de engranaje mínimo obtenido en las pruebas experimentales fue el del experimento #7, con un perfil promedio izquierdo de -3.9  $\mu\text{m}$  y un perfil promedio derecho de -1.3  $\mu\text{m}$ , como se muestra en el reporte de la figura 6.9. En el anexo II se muestran las figuras correspondientes a los reportes de los experimentos restantes.

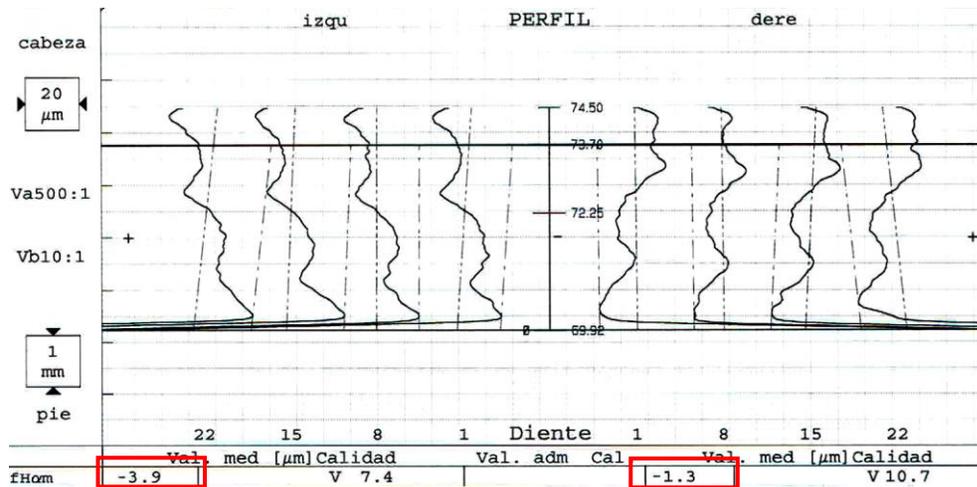


Figura 6.9 – Resultado de la geometría en la experimentación #7.

Realizar un análisis del diseño de experimentos de los resultados de la geometría por vías convencionales es complicado e implicaría mucho tiempo y recursos, es por esta razón que se utilizó el método Taguchi y ANOVA para observar el comportamiento e incidencia sobre el proceso.

## 6.6 Análisis de resultados por el método Taguchi y ANOVA

Con la obtención de todos los resultados de las pruebas experimentales, se procedió a realizar el análisis y la optimización de los datos mediante el método Taguchi y ANOVA.

La optimización de Taguchi determina la influencia de cada una de las variables del proceso (velocidad de corte, avance radial inicial, avance radial final y velocidad de generación) respecto al desgaste de la herramienta, rugosidad

superficial, tiempo de maquinado y geometría del engranaje, empleando el criterio de ***‘el más pequeño es el mejor’***.

Los datos han sido analizados por medio del software Minitab 15, que incluye un módulo enfocado al método Taguchi y ANOVA, permitiendo un rápido y preciso estudio de los resultados, además de contar con un sistema amigable y de rápido entendimiento.

### 6.6.1 Variables óptimas para el mínimo desgaste de la herramienta

La tabla 6.7 indica los valores medios de señal-ruido para el desgaste total de la herramienta, donde el grado es la magnitud de influencia de la variable sobre el desgaste.

*Tabla 6.7 – Tabla de respuestas de relación de señal- ruido para el desgaste de la herramienta.*

Nivel	Velocidad de corte	Avance radial inicial	Avance radial final	Velocidad de generación
1	-27.92	-30.73	-30.86	-30.47
2	-30.72	-30.01	-30.19	-29.76
3	-32.14	-30.04	-29.73	-30.56
Delta	4.22	0.73	1.12	0.80
Grado	1	4	2	3

La magnitud de influencia, muestra que la variable que más incide en el desgaste de la herramienta es la velocidad de corte en primer lugar, seguido por el avance radial final, luego la velocidad de generación y por último el avance radial inicial.

En la figura 6.10 se muestran los valores medios de la velocidad de corte, avance radial inicial, avance radial final y velocidad de generación con respecto al desgaste. En la gráfica, el eje X indica el valor de los parámetros de corte y el eje Y indica el desgaste de la herramienta.

### Gráfica de efectos principales para Medias

Medias de datos para el desgaste total

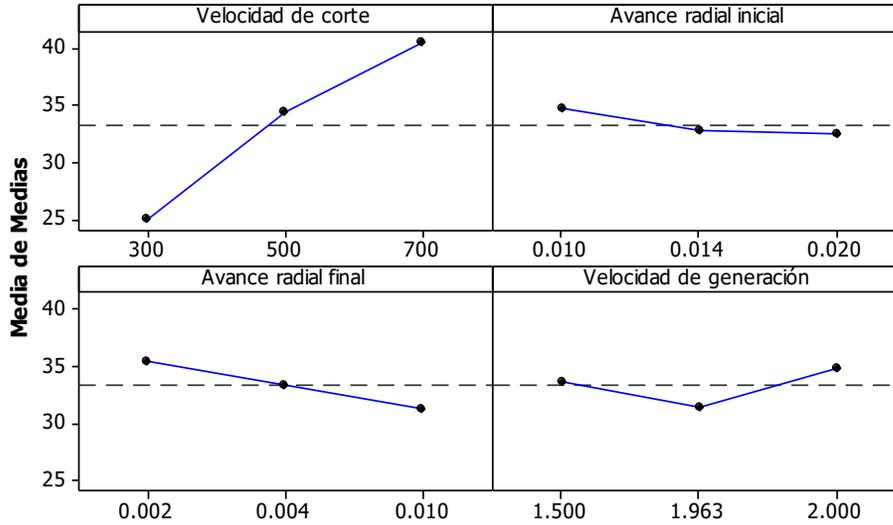
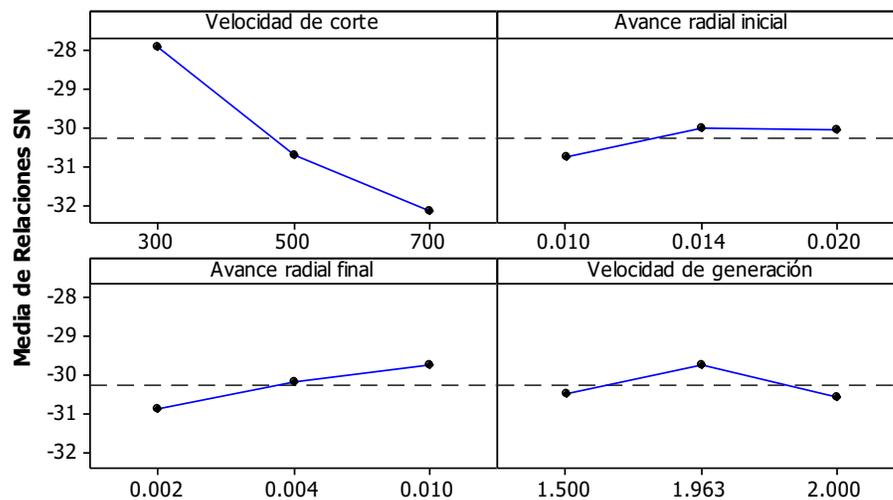


Figura 6.10 – Media de los valores medios del desgaste total.

En la figura 6.11 se presentan los valores medios de relaciones de señal-ruido para las cuatro variables principales por separado, velocidad de corte, avance radial inicial, avance radial final y velocidad de generación.

### Gráfica de efectos principales para Relaciones SN

Medias de datos para el desgaste total



Señal a ruido: Más pequeño es mejor

Figura 6.11 – Media de las relaciones de señal-ruido del desgaste total.

Los parámetros óptimos de corte son aquellos que tienen un valor mayor de señal-ruido, es decir,

Los parámetros de corte para obtener un menor desgaste de la herramienta, son: velocidad de corte = 300 golpes/min, avance radial inicial = 0.020 mm/golpe, avance radial final = 0.010 mm/golpe y una velocidad de generación = 1.963 mm/golpe. Esta combinación de parámetros no coincide con ninguno de los experimentos realizados.

El ANOVA es utilizado para identificar que variables independientes afectan la variable dependiente. Los resultados del ANOVA de las medias para el desgaste de la herramienta son presentados en la tabla 6.8. El análisis se llevó a cabo con un nivel de confianza del 95% y un nivel de significancia de 0.05, todo valor mayor a 0.05 no tendrá influencia significativa.

Tabla 6.8 – ANOVA de medias para el desgaste de herramienta.

Fuente	GL	SC	MC	F	<i>p</i>	
Velocidad de corte	2	364.982	182.491	43.80	0.022	87.60%
Avance radial final	2	26.000	13.000	3.12	0.243	6.24%
Vel. de generación	2	17.354	8.677	2.08	0.324	4.16%
Error	2	8.332	4.166			
Total	8	416.669				
S = 2.04112 R-cuad. = 98.00% R-cuad. (ajustado) = 92.00%						
GL = grados de libertad SC = suma de los cuad. MC = media de los cuad.						

El ANOVA de medias de la tabla 6.8 determina la influencia de cada una de las variables en el proceso. En este análisis se excluyó el avance radial inicial debido a que en la tabla de respuestas medias de señal-ruido (tabla 6.7), mostró que no era un parámetro influyente, como lo indica Krishnaiah y Shahabudeen (Krishnaiah & Shahabudeen, 2012). Los *p*-valores más grandes corresponden al avance radial final y la velocidad de generación, esto quiere decir que no tienen influencia significativa en el desgaste de la herramienta. Sin embargo, el *p*-valor

de la velocidad de corte es de 0.022, esto indica que la influencia de la velocidad de corte es significativa.

La figura 6.12 representa en un histograma la influencia de las variables en el desgaste de la herramienta. Se observa que la variable que tiene más influencia en el desgaste es la velocidad de corte, con un 87.60%.

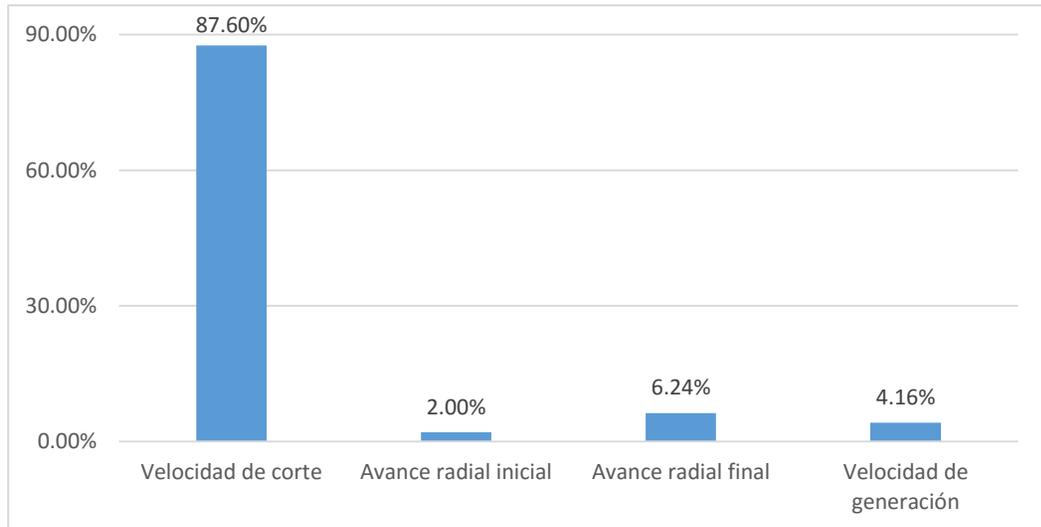


Figura 6.12 – Influencia de cada una de las variables para minimizar el desgaste.

La ecuación de regresión obtenida es la ecuación 6.1:

*Desgaste total*

$$= 20.8 + (0.0387 * \text{velocidad de corte}) - (203 * \text{avance radial inicial}) - (480 * \text{avance radial final}) - (0.72 * \text{velocidad de generación}) \quad (6.1)$$

La figura 6.13 representa el modelo experimental frente al modelo ajustado. Se determina que es aceptable la aproximación de ambos modelos, excepto para el experimento 2, donde se observa una desviación entre el modelo experimental y el modelo ajustado con un porcentaje de error de 16%.

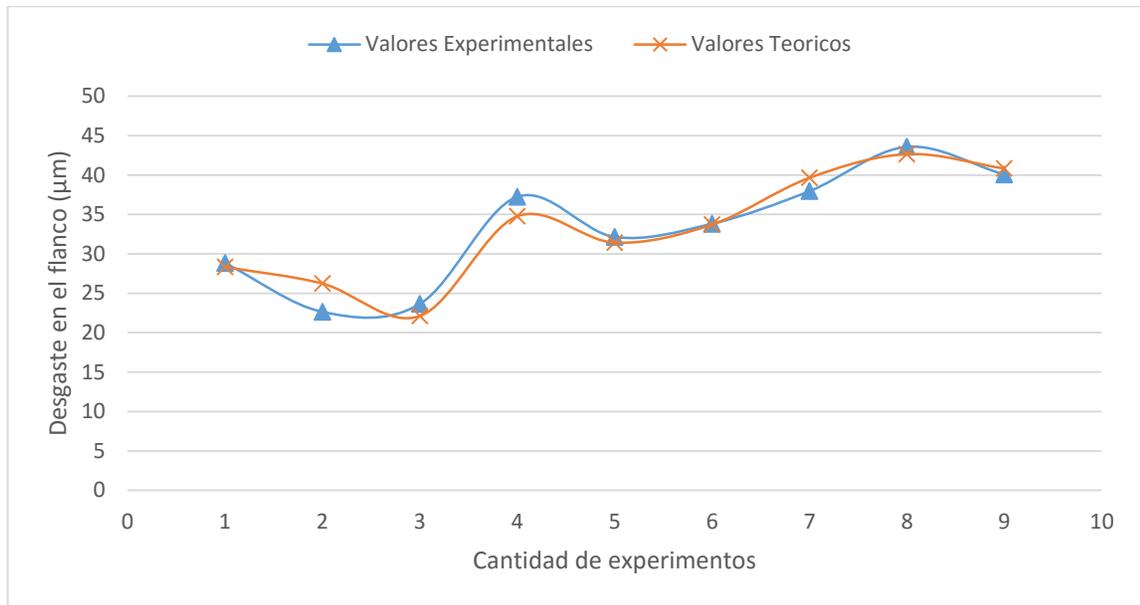


Figura 6.13 – Desgaste de la herramienta experimental frente a la curva de desgaste ajustada.

Se predijo el desgaste de la herramienta por medio del método Taguchi con los parámetros óptimos, y el resultado fue de 21.10 µm, con un intervalo de confianza de  $\pm 7.74$  µm. Dando como resultado un rango predicción de  $13.36 \leq \text{Desgaste } (\mu\text{m}) \leq 28.85$ .

### 6.6.2 Variables óptimas para la mínima rugosidad superficial $R_a$

Los valores medios de señal-ruido para la rugosidad superficial  $R_a$  de la pieza maquinada se indican en la tabla 6.9. Donde el grado es la magnitud de influencia de la variable sobre la rugosidad superficial.

Tabla 6.9 – Tabla de respuestas de relación señal- ruido para  $R_a$ .

Nivel	Velocidad de corte	Avance radial inicial	Avance radial final	Velocidad de generación
1	-12.33	-13.06	-12.21	-12.24
2	-13.12	-12.14	-13.36	-13.19
3	-12.41	-12.65	-12.29	-12.43
Delta	0.79	0.91	1.15	0.95
Grado	4	3	1	2

La magnitud de influencia, muestra que la variable que más incide en  $R_a$  es el avance radial final en primer lugar, seguido por la velocidad de generación, luego el avance radial inicial y por último la velocidad de corte.

En la figura 6.14 se muestran los valores medios de la velocidad de corte, avance radial inicial, avance radial final y velocidad de generación con respecto a  $R_a$ . En la gráfica, el eje X indica el valor de los parámetros de corte y el eje Y indica la rugosidad superficial.

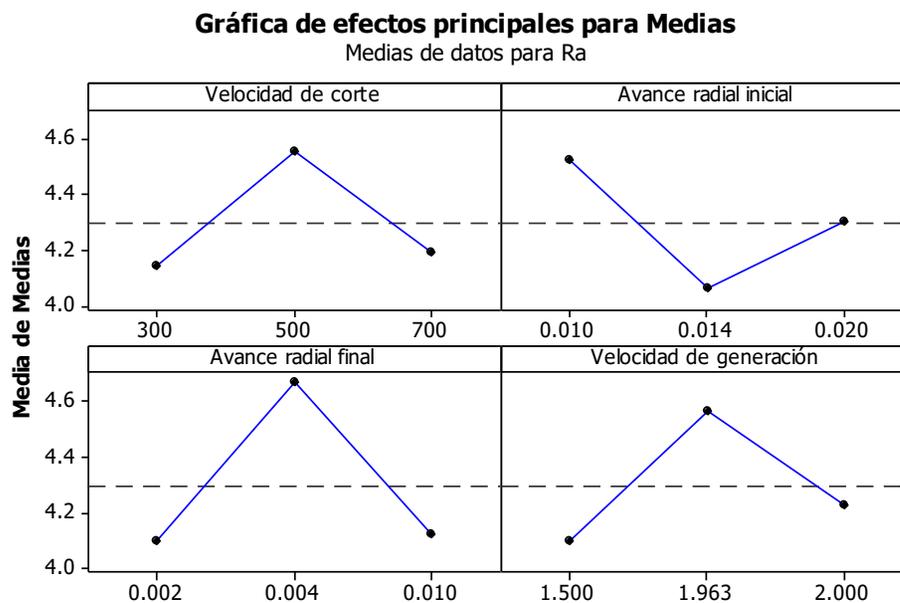


Figura 6.14 – Media de los valores medios para  $R_a$ .

Los valores medios de relaciones de señal-ruido para las cuatro variables principales por separado, velocidad de corte, avance radial inicial, avance radial final y velocidad de generación se presentan en la figura 6.15.

Los parámetros óptimos de corte son aquellos que tienen un valor mayor de señal-ruido, es decir,

Los parámetros de corte para obtener una menor rugosidad superficial, son: velocidad de corte = 300 golpes/min, avance radial inicial = 0.014 mm/golpe, avance radial final = 0.002 mm/golpe y una velocidad de generación = 1.50

mm/golpe. Esta combinación de parámetros no coincide con ninguno de los experimentos realizados.

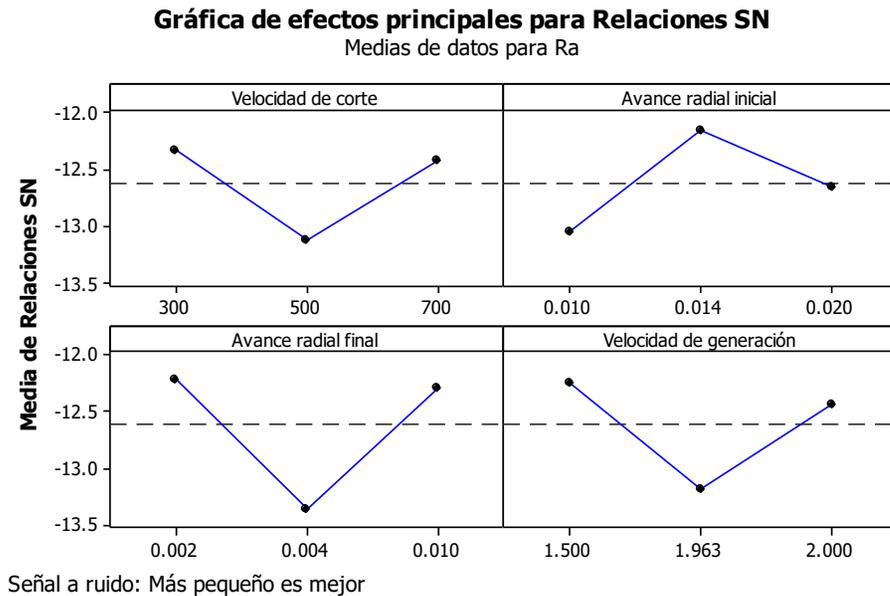


Figura 6.15 – Media de las relaciones de señal-ruido de Ra.

El ANOVA es utilizado para identificar que variables independientes afectan la variable dependiente. Los resultados del ANOVA de las medias para Ra son presentados en la tabla 6.10. El análisis se llevó a cabo con un nivel de confianza del 95% y un nivel de significancia de 0.05, todo valor mayor a 0.05 no tendrá influencia significativa.

Tabla 6.10 – ANOVA de medias para Ra.

Fuente	GL	SC	MC	F	p	
Avance radial inicial	2	0.3131	0.1565	1.04	0.491	19.76%
Avance radial final	2	0.6208	0.3104	2.05	0.327	39.19%
Vel. de generación	2	0.3480	0.1740	1.15	0.465	21.97%
Error	2	0.3023	0.1511			
Total	8	1.5842				
S = 0.388773 R-cuad. = 80.92% R-cuad. (ajustado) = 23.68%						
GL = grados de libertad SC = suma de los cuad. MC = media de los cuad.						

El ANOVA de medias determina la influencia de cada una de las variables en el proceso. En este análisis se excluyó la velocidad de corte debido a que en la tabla de respuestas medias de señal-ruido (tabla 6.9), mostró que no era un parámetro influyente. Los  $p$ -valores más grandes corresponden al avance radial inicial y la velocidad de generación, esto quiere decir que no tienen influencia significativa en la rugosidad superficial. Sin embargo, el  $p$ -valor del avance radial final es de 0.327, esto indica que la influencia del avance radial final tampoco es significativa.

La figura 6.16 representa en un histograma la influencia de las variables en  $R_a$ . Se observa que la variable que tiene más influencia en la rugosidad superficial  $R_a$  es el avance radial final, con un 39.01%.

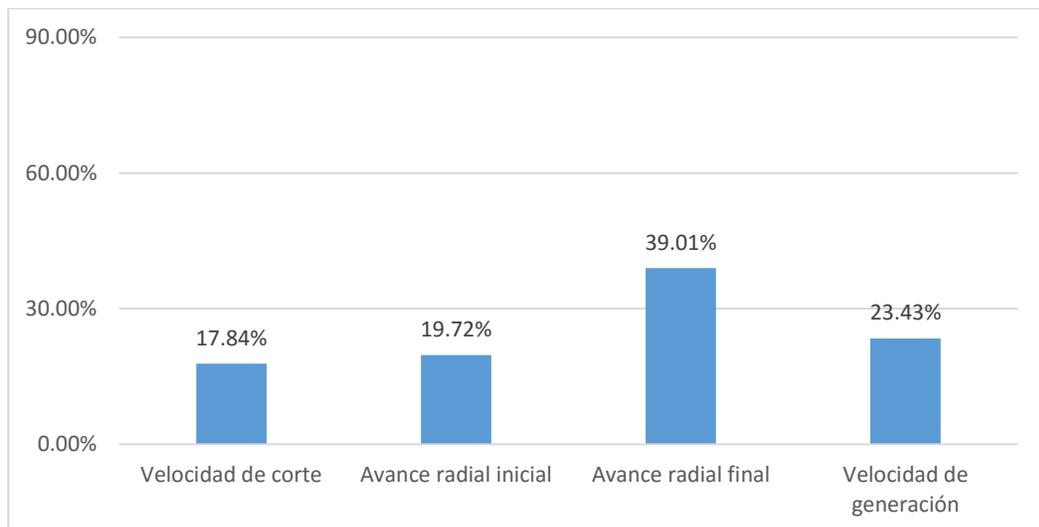


Figura 6.16 – Influencia de cada una de las variables para minimizar  $R_a$ .

La ecuación de regresión obtenida es la ecuación 6.2:

$$Ra = 20.8 + (0.00012 * velocidad\ de\ corte) - (16.8 * avance\ radial\ inicial) - (18.3 * avance\ radial\ final) - (0.577 * velocidad\ de\ generación) \quad (6.2)$$

La figura 6.17 representa el modelo experimental frente al modelo ajustado. Se determina que es aceptable la aproximación de ambos modelos,

excepto para el experimento 4 y 8, donde se observa una desviación entre el modelo experimental y el modelo ajustado con un error de 11% y 22% respectivamente.

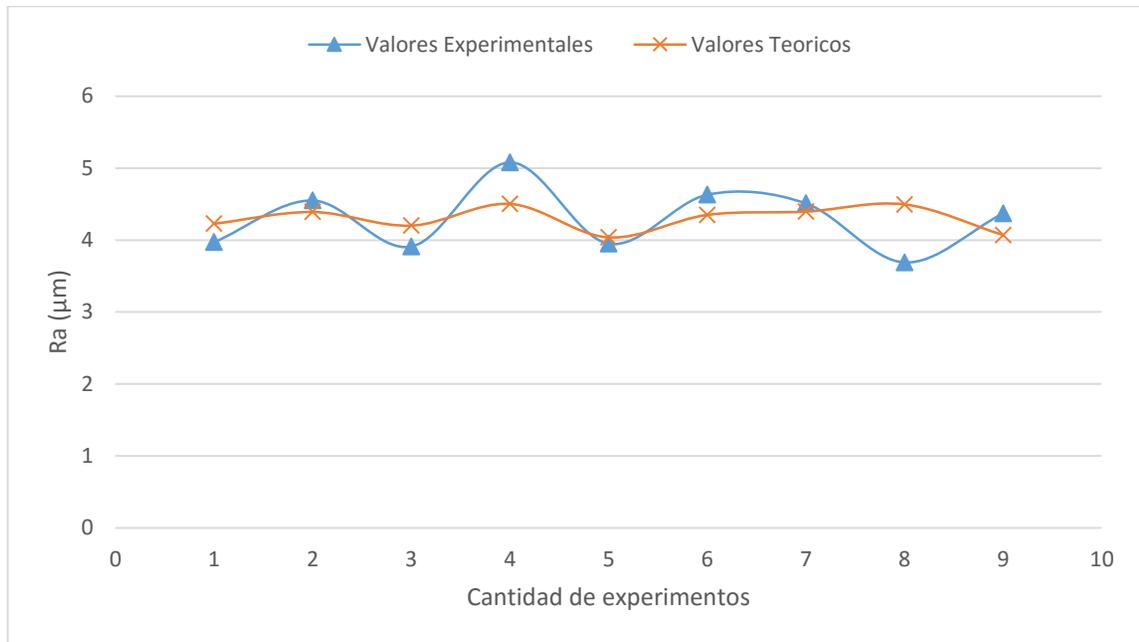


Figura 6.17 – Ra experimental frente a la curva de Ra ajustada.

Se predijo la rugosidad superficial  $R_a$  por medio del método Taguchi con los parámetros óptimos, y el resultado fue de  $3.66 \mu\text{m}$ , con un intervalo de confianza de  $\pm 1.47 \mu\text{m}$ . Dando como resultado un rango de predicción de  $2.19 \leq R_a (\mu\text{m}) \leq 5.14$ .

### 6.6.3 Variables óptimas para la mínima rugosidad superficial $R_z$

Los valores medios de señal-ruido para la rugosidad superficial  $R_z$  de la pieza maquinada son indicados en la tabla 6.11; donde el grado es la magnitud de influencia de la variable sobre esta medida.

Tabla 6.11 – Tabla de respuestas de relación señal- ruido para Rz.

Nivel	Velocidad de corte	Avance radial inicial	Avance radial final	Velocidad de generación
1	-22.27	-21.91	-21.76	-21.89
2	-21.75	-21.85	-22.50	-21.98
3	-21.76	-22.03	-21.52	-21.91
Delta	0.52	0.19	0.97	0.09
Grado	2	3	1	4

La variable que más incide en Rz, es el avance radial final, seguido por la velocidad de corte, el avance radial inicial y por último la velocidad de generación.

La figura 6.18 presenta una gráfica con los valores medios de la velocidad de corte, avance radial inicial, avance radial final y velocidad de generación con respecto a Rz. En la gráfica, el eje X indica el valor de los parámetros de corte y el eje Y indica la rugosidad superficial Rz.

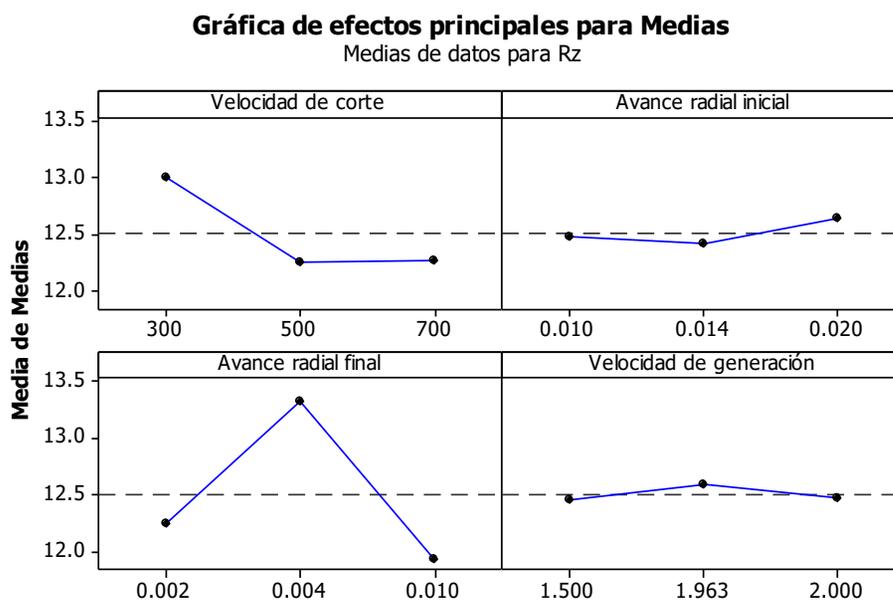


Figura 6.18 – Media de los valores medios para Rz.

Los valores medios de relación de señal-ruido para las cuatro variables principales por separado, velocidad de corte, avance radial inicial, avance radial final y velocidad de generación, son mostradas en la figura 6.19.

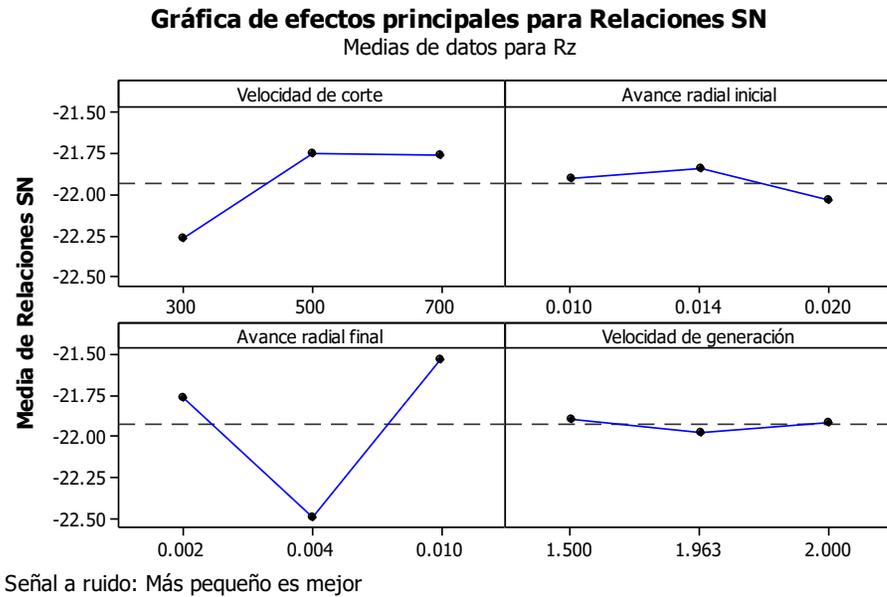


Figura 6.19 – Media de las relaciones de señal-ruido de Rz.

Los parámetros óptimos de corte son aquellos que tienen un valor mayor de señal-ruido, es decir,

Los parámetros de corte para obtener una menor rugosidad superficial, son: velocidad de corte = 500 golpes/min, avance radial inicial = 0.014 mm/golpe, avance radial final = 0.01 mm/golpe y una velocidad de generación = 1.50 mm/golpe. Esta combinación de parámetros coincide con el experimento 5 de los ensayos realizados.

El ANOVA es utilizado para identificar que variables independientes afectan la variable dependiente. Los resultados del ANOVA de las medias para Rz son presentados en la tabla 6.12. El análisis se llevó acabo con un nivel de confianza del 95% y un nivel de significancia de 0.05, todo valor mayor a 0.05 no tendrá influencia significativa.

Tabla 6.12 – ANOVA de medias para Rz.

Fuente	GL	SC	MC	F	p	
Velocidad de corte	2	1.12016	0.56008	33.18	0.029	24.93%
Avance radial inicial	2	0.08809	0.04404	2.61	0.277	1.96%
Avance radial final	2	3.25182	1.62591	96.33	0.010	72.36%
Error	2	0.03376	0.01688			
Total	8	4.49382				
S = 0.129915 R-cuad. = 99.25% R-cuad. (ajustado) = 97.00%						
GL = grados de libertad SC = suma de los cuad. MC = media de los cuad.						

El ANOVA de medias determina la influencia de cada una de las variables en el proceso. En este análisis se excluyó la velocidad de generación debido a que en la tabla de respuestas medias de señal-ruido (tabla 6.11), mostró que no era un parámetro influyente. El  $p$ -valor más grande corresponde al avance radial inicial, esto quiere decir que no tiene influencia significativa en la rugosidad superficial  $R_z$ . Sin embargo, el  $p$ -valor del avance radial final y la velocidad de corte, es de 0.010 y 0.029 respectivamente, esto indica que la influencia de ambas variables es significativa.

La figura 6.20 representa en un histograma la influencia de las variables en el desgaste de la herramienta. Se observa que la variable que tiene más influencia en la rugosidad superficial  $R_z$  es el avance radial final, con un 71.85%.

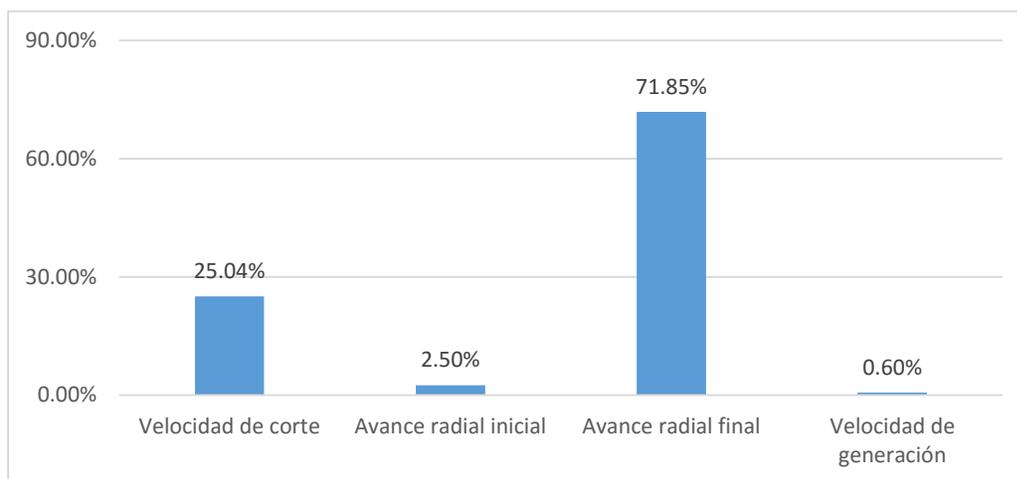


Figura 6.20 – Influencia de cada una de las variables para minimizar Rz.

La ecuación de regresión obtenida es la ecuación 6.3:

$$R_z = 13.9 - (0.00186 * \text{velocidad de corte}) - (85.5 * \text{avance radial final}) \quad (6.3)$$

La figura 6.21 representa el modelo experimental frente al modelo ajustado. Se determina que es aceptable la aproximación de ambos modelos, excepto para el experimento 9, donde se observa una desviación entre el modelo experimental y el modelo ajustado con un porcentaje de error de 11%.

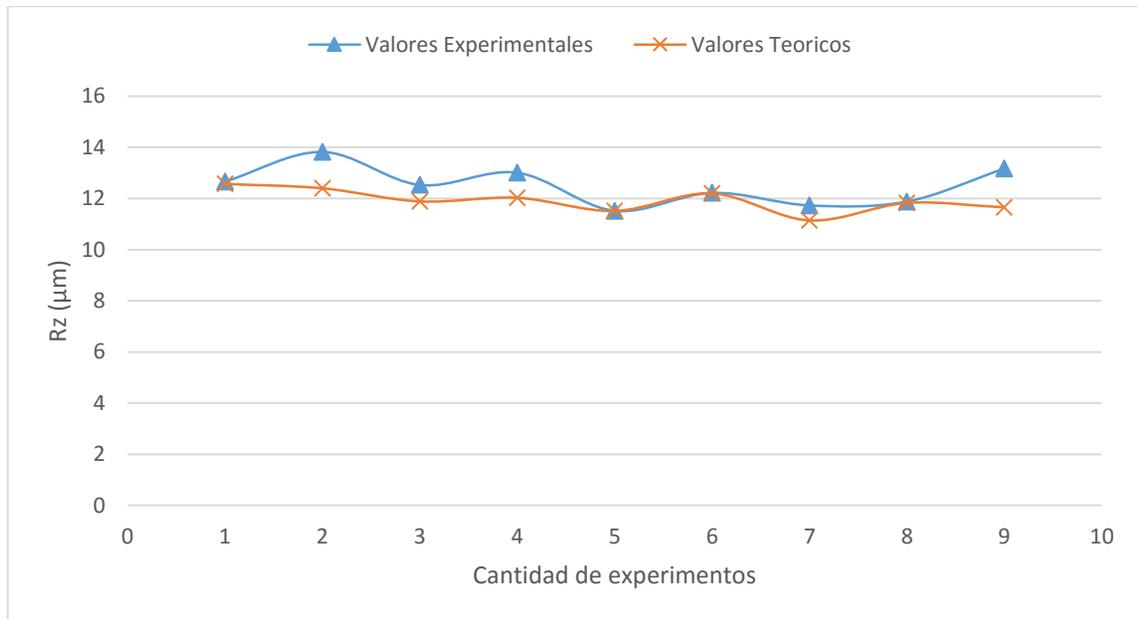


Figura 6.21 – Rz experimental frente a la curva de Rz ajustada.

Se predijo la rugosidad superficial  $R_z$  por medio del método Taguchi con los parámetros óptimos, y el resultado fue de  $11.58 \mu\text{m}$ , con un intervalo de confianza de  $\pm 0.49 \mu\text{m}$ . Dando como resultado un rango de  $11.08 \leq R_z (\mu\text{m}) \leq 12.07$ .

#### 6.6.4 Variables óptimas para minimizar el tiempo de maquinado

La tabla 6.13 indica los valores medios de señal-ruido para el tiempo de maquinado de la pieza maquinada, donde el grado es la magnitud de influencia de la variable sobre el tiempo.

Tabla 6.13 – Tabla de respuestas de relación señal- ruido para el tiempo de maquinado.

Nivel	Velocidad de corte	Avance radial inicial	Avance radial final	Velocidad de generación
1	-42.44	-39.50	-40.48	-39.26
2	-38.17	-38.24	-38.67	-37.98
3	-34.92	-37.70	-36.38	-38.28
Delta	7.52	1.70	4.09	1.28
Grado	1	3	2	4

La magnitud de influencia muestra que la variable que más incide en el tiempo es la velocidad de corte en primer lugar, seguido por el avance radial final, luego el avance radial inicial y por último la velocidad de generación.

La figura 6.22 presenta una gráfica con los valores medios de la velocidad de corte, avance radial inicial, avance radial final y velocidad de generación con respecto al tiempo de maquinado. En la gráfica, el eje X indica el valor de los parámetros de corte y el eje Y indica el tiempo.

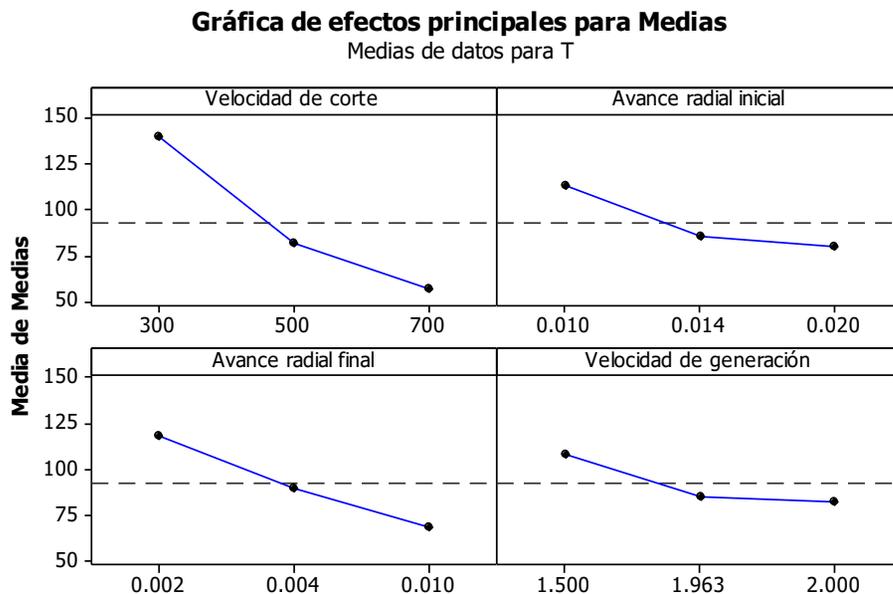
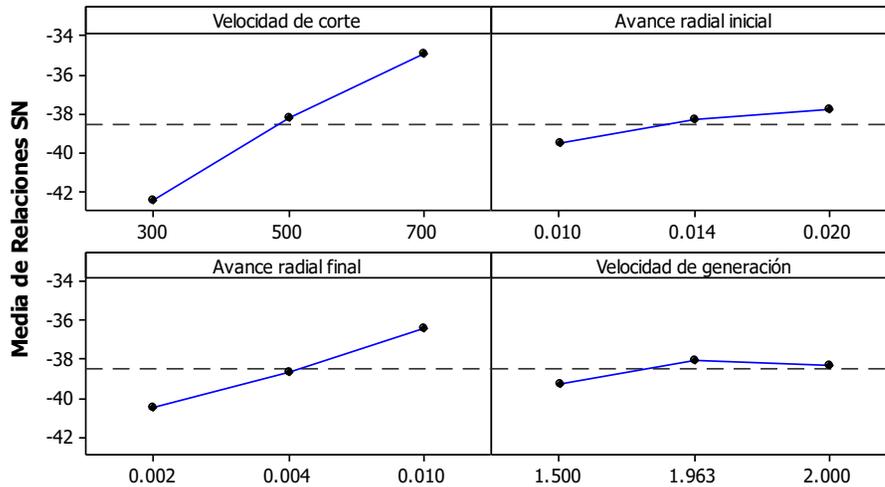


Figura 6.22 – Media de los valores medios para el tiempo.

En la figura 6.23 se presentan los valores medios de relaciones de señal-ruido para las cuatro variables principales por separado, velocidad de corte, avance radial inicial, avance radial final y velocidad de generación.

### Gráfica de efectos principales para Relaciones SN

Medias de datos para T



Señal a ruido: Más pequeño es mejor

Figura 6.23 – Media de las relaciones de señal-ruido para el tiempo.

Los parámetros de corte para obtener un menor tiempo de maquinado, son: velocidad de corte = 700 golpes/min, avance radial inicial = 0.020 mm/golpe, avance radial final = 0.010 mm/golpe y una velocidad de generación = 1.963 mm/golpe. Esta combinación de parámetros no coincide con ninguno de los experimentos realizados.

Los resultados del ANOVA de las medias para el tiempo de maquinado son presentados en la tabla 6.14.

Tabla 6.14 – ANOVA de medias para el tiempo.

Fuente	GL	SC	MC	F	p	
Velocidad de corte	2	10950.2	5475.1	8.92	0.101	61.03%
Avance radial inicial	2	1934.9	967.4	1.58	0.388	10.78%
Avance radial final	2	3829.6	1914.8	3.12	0.243	21.34%
Error	2	1227.6	613.8			
Total	8	17942.2				
S = 24.7745 R-cuad. = 93.16% R-cuad. (ajustado) = 72.63%						
GL = grados de libertad SC = suma de los cuad. MC = media de los cuad.						

El ANOVA de las medias determina la influencia de cada una de las variables en el proceso. En este análisis se excluyó la velocidad de generación, debido a que en la tabla de respuestas medias de señal-ruido (tabla 6.13), mostró que no era un parámetro influyente. Los  $p$ -valores más grandes corresponden al avance radial inicial y el avance radial final, esto quiere decir que no tienen influencia significativa en el tiempo de maquinado. Sin embargo, el  $p$ -valor de la velocidad de corte es de 0.101, esto indica que la influencia de la velocidad de corte tampoco es significativa.

La figura 6.24 representa en un histograma la influencia de las variables en el tiempo de maquinado. Se observa que la variable que tiene más influencia en el tiempo es la velocidad de corte, con un 72.32%.

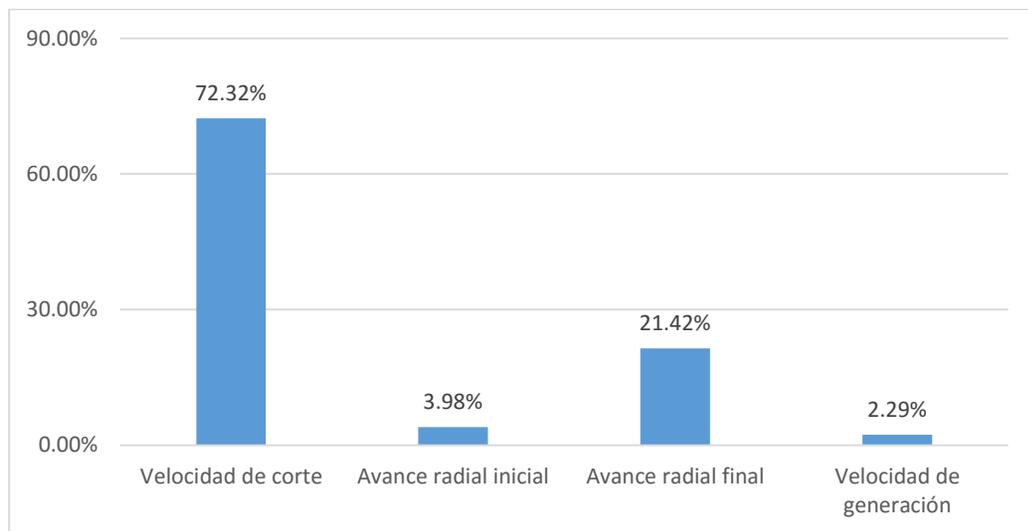


Figura 6.24 – Influencia de cada una de las variables para minimizar el tiempo.

La ecuación de regresión obtenida es la ecuación 6.4:

$$T = 367 - (0.208 * \text{velocidad de corte}) - (3180 * \text{avance radial inicial}) - (5660 * \text{avance radial final}) - (51.3 * \text{velocidad de generación}) \quad (6.4)$$

La figura 6.25 representa el modelo experimental frente al modelo ajustado. Se determina que es medianamente aceptable la aproximación de ambos modelos, ya que el error entre ambos es del 12.66%.

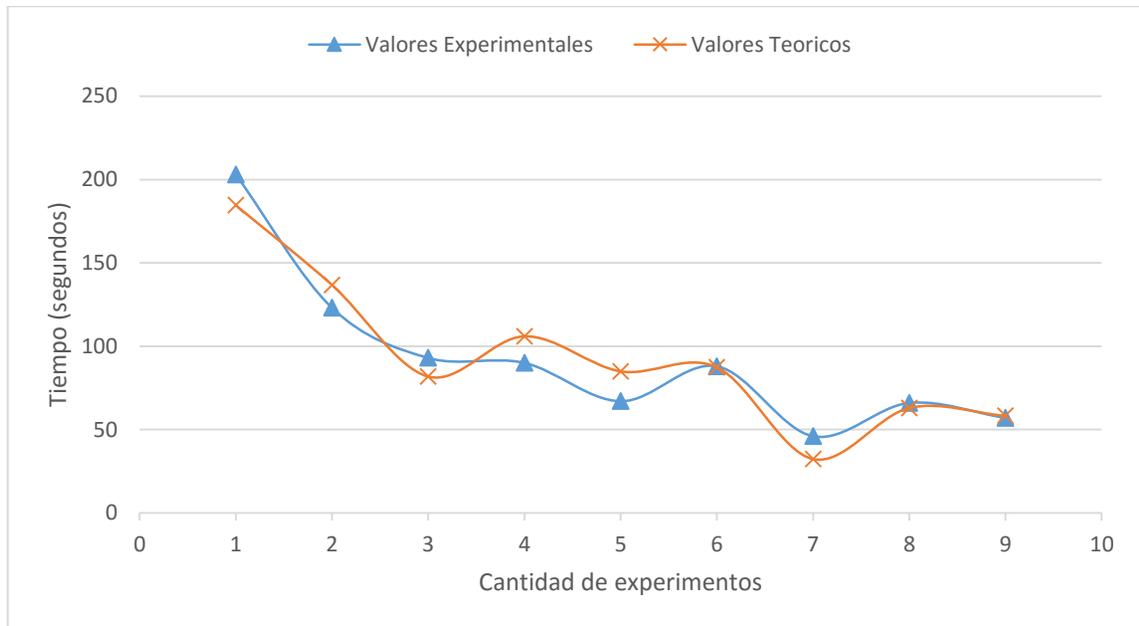


Figura 6.25 – Tiempo experimental frente a la curva de tiempo ajustada.

Se predijo el tiempo de maquinado por medio del método Taguchi con los parámetros óptimos, y el resultado fue de 19.21  $\mu\text{m}$ , con un intervalo de confianza de  $\pm 94.00 \mu\text{m}$ . Dando como resultado un rango de  $-74.79 \leq T (\mu\text{m}) \leq 113.22$ .

### 6.6.5 Variables óptimas para obtener la geometría dentro de las especificaciones permisibles

La tabla 6.15 indica los valores medios de señal-ruido para la geometría del engranaje. Donde el grado es la magnitud de influencia de la variable sobre la geometría.

Tabla 6.15 – Tabla de respuestas de relación señal- ruido para la geometría.

Nivel	Velocidad de corte	Avance radial inicial	Avance radial final	Velocidad de generación
1	-1.813	-3.483	-2.741	-3.196
2	-2.847	-3.087	-2.004	-3.489
3	-3.474	-1.564	-3.390	-1.449
Delta	1.661	1.918	1.386	2.040
Grado	3	2	4	1

La magnitud de influencia muestra que la variable que más incide en la geometría es la velocidad de generación en primer lugar, seguido por el avance radial inicial, luego la velocidad de corte y por último el avance radial final.

La figura 6.26 presenta una gráfica con los valores medios de la velocidad de corte, avance radial inicial, avance radial final y velocidad de generación con respecto a la geometría del engranaje. En la gráfica, el eje X indica el valor de los parámetros de corte y el eje Y indica la geometría.

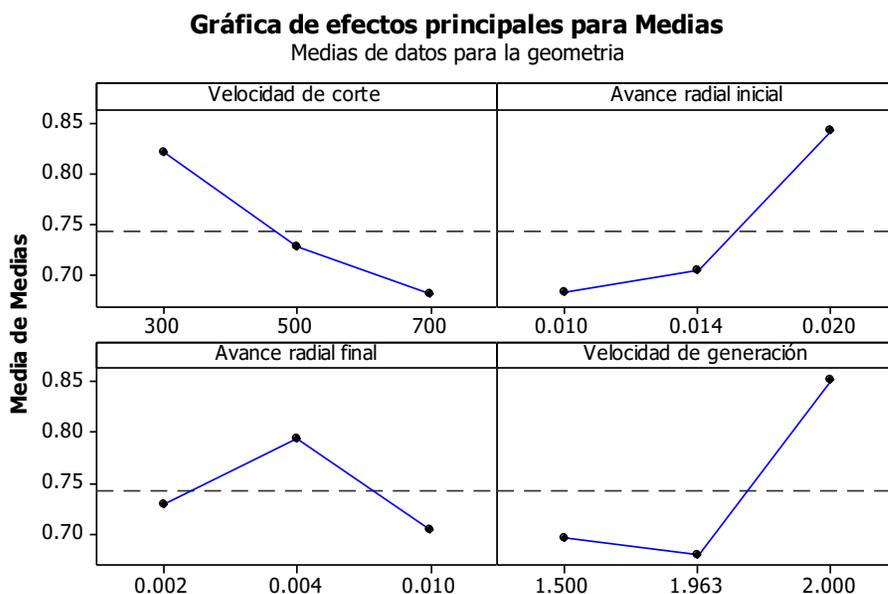


Figura 6.26 – Media de los valores medios para la geometría.

los valores medios de relaciones de señal-ruido para las cuatro variables principales por separado, velocidad de corte, avance radial inicial, avance radial final y velocidad de generación, se presentan en la figura 6.27.

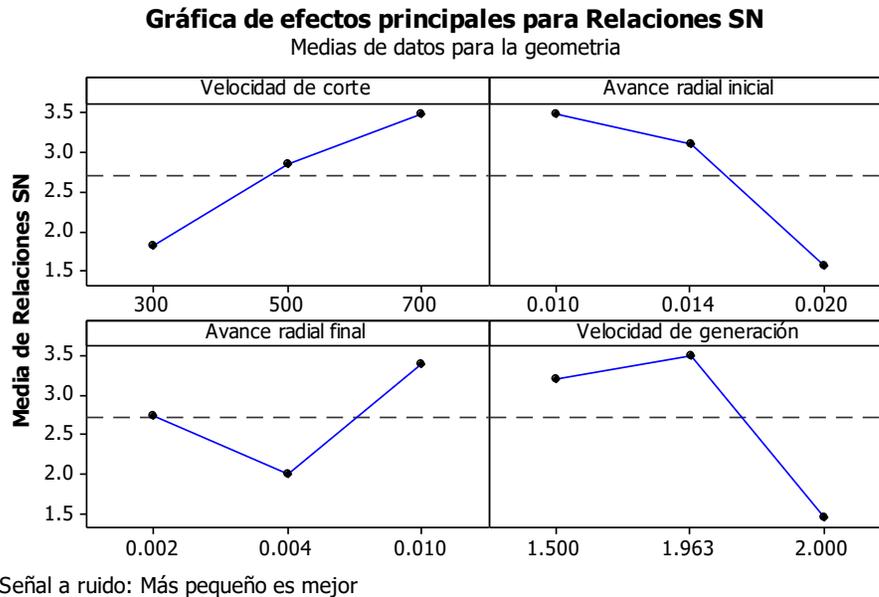


Figura 6.27 – Media de las relaciones de señal-ruido de la geometría.

Los parámetros óptimos de corte son aquellos que tienen un valor mayor de señal-ruido, es decir,

Los parámetros de corte para obtener una mejor geometría del engranaje, son: velocidad de corte = 700 golpes/min, avance radial inicial = 0.010 mm/golpe, avance radial final = 0.010 mm/golpe y una velocidad de generación = 1.963 mm/golpe. Esta combinación de parámetros no coincide con ninguno de los experimentos realizados.

El ANOVA es utilizado para identificar que variables independientes afectan la variable dependiente. Los resultados del ANOVA de las medias para la geometría son presentados en la tabla 6.16. El análisis se llevó a cabo con un nivel de confianza del 95% y un nivel de significancia de 0.05, todo valor mayor a 0.05 no tendrá influencia significativa.

Tabla 6.16 – ANOVA de medias para la geometría.

Fuente	GL	SC	MC	F	p	
Velocidad de corte	2	0.030297	0.015149	2.34	0.299	21.26%
Avance radial inicial	2	0.044725	0.022363	3.46	0.224	31.37%
Vel. de generación	2	0.054590	0.027295	4.22	0.191	38.30%
Error	2	0.012927	0.006463			
Total	8	0.142540				
S = 0.0803952 R-cuad. = 90.93% R-cuad. (ajustado) = 63.72%						
GL = grados de libertad SC = suma de los cuad. MC = media de los cuad.						

El ANOVA de medias determina la influencia de cada una de las variables en el proceso. En este análisis se excluyó el avance radial final debido a que en la tabla de respuestas medias de señal-ruido (tabla 6.15), mostró que no era un parámetro influyente. Los  $p$ -valores más grandes corresponden al avance radial inicial y la velocidad de corte, esto quiere decir que no tienen influencia significativa en la geometría del engranaje. Sin embargo, el  $p$ -valor de la velocidad de generación es de 0.191, esto indica que la influencia de la velocidad de generación tampoco es significativa.

La figura 6.28 representa en un histograma la influencia de las variables en la geometría. Se observa que la variable que tiene más influencia en la geometría es la velocidad de generación con un 35.49%, seguido del avance radial inicial con un 29.94%.

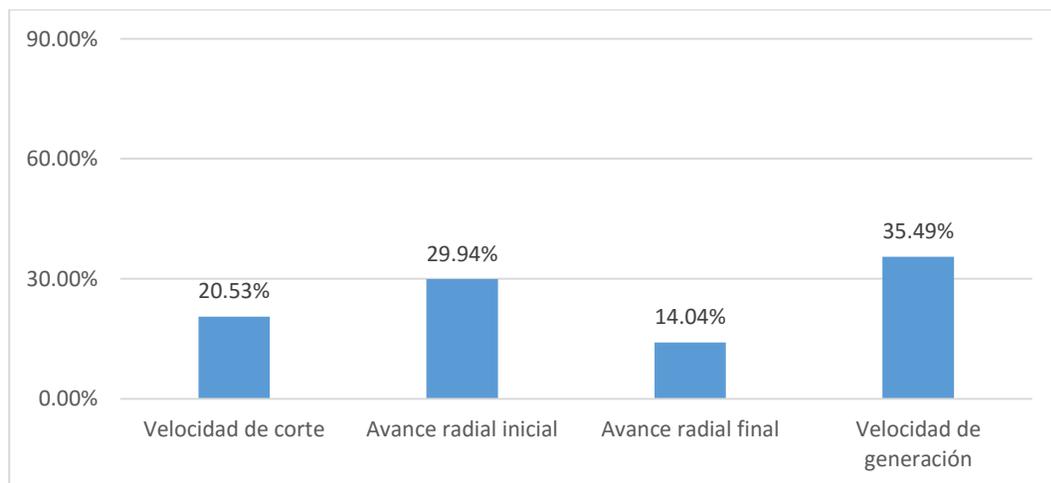


Figura 6.28 – Influencia de cada una de las variables para mejorar geometría.

## 6.7 Discusión del análisis por el método Taguchi y ANOVA

Del análisis se puede observar que para cada una de las variables dependientes existen diferentes juegos de factores influyentes. El resumen de los resultados se detalla a continuación:

### a) Desgaste del flanco de la herramienta

En el análisis de señal-ruido de la tabla 6.7, se puede observar que la velocidad de corte tiene una fuerte influencia en el desgaste, seguido del avance radial final, por otra parte, se puede observar que la velocidad de generación y el avance radial inicial son factores no influyentes en el proceso para reducir el desgaste.

Basados en el ANOVA el porcentaje de contribución que tiene la velocidad de corte en el desgaste es de 87.60%, dejando solo un 12.4% para el resto de las variables del proceso. De las figuras 6.10 y 6.11 se puede concluir que el desgaste tiende a ser casi una función lineal incremental de la velocidad de corte, en otras palabras, a medida que aumenta la velocidad de corte a su vez lo hará el desgaste de la herramienta. También se puede apreciar que a medida que el avance radial final aumenta, así mismo el desgaste de la herramienta tiende a disminuir pero en menor magnitud que con la velocidad de corte. De acuerdo a los resultados del método Taguchi por medio del análisis de señal-ruido y el ANOVA, la combinación de parámetros de operación que ayudan a reducir el desgaste de la herramienta se muestra en la tabla 6.17:

*Tabla 6.17 – Parámetros óptimos para el desgaste de la herramienta.*

Velocidad de corte (golpe/min)	Avance radial inicial (mm/golpe)	Avance radial final (mm/golpe)	Velocidad de generación (mm/golpe)
300	0.020	0.010	1.963

Los parámetros óptimos de corte para reducir el desgaste equivalen a, disminuir la velocidad de corte al mínimo nivel (300 golpes/min), incrementar el avance radial final a su máximo nivel (0.010 mm/golpe), la velocidad de

generación en su nivel medio (1.963 mm/golpe) y el avance radial inicial a su nivel máximo (0.020 mm/golpe).

Las relaciones entre los parámetros de corte y el desgaste de la herramienta fueron modelados por medio de regresión lineal utilizando el software Minitab 15. La figura 6.13 muestra el comportamiento del desgaste con los valores experimentales frente a los valores teóricos obtenidos por medio de la ecuación 6.1, se determina que es aceptable la aproximación de ambos modelos con un porcentaje de error de 4.63%. El valor de predicción propuesto por el método Taguchi para el desgaste es de 21.10  $\mu\text{m}$ , con un intervalo de confianza de  $\pm 7.74 \mu\text{m}$ . Esto quiere decir que el desgaste luego de una prueba de confirmación podría tomar cualquier valor entre el siguiente rango,  $13.36 \leq \text{Desgaste } (\mu\text{m}) \leq 28.85$ .

Una de la razones por las que la velocidad de corte es la que más influye puede deberse, a que a medida que la velocidad de corte aumenta también se da un incremento en la temperatura entre la pieza maquinada y el cortador. La alta temperatura generada en la zona causa pérdida de tenacidad y aparece la deformación plástica (Kabakli, 2009).

Los resultados de este estudio se refuerzan con el estudio de Hascalik y Caydas (Hascalik & Caydas , 2008), donde evaluaron la velocidad de corte, el avance y la profundidad de corte en un proceso de torneado, determinaron por medio del método Taguchi, que el factor más influyente en el desgaste de un inserto CNMG 120408-883 fue la velocidad de corte con 73.69%. A su vez, Gupta et al. (Gupta, Singh, & Sood, 2015), reporto de un proceso de torneado que la velocidad de corte fue su segundo mayor factor influyente con 20.5%, solo superado por las condiciones de lubricación. En un proceso de torneado Kumar et al. (Kumar & Pradhan, 2013), determinaron por medio del método Taguchi que el parámetro más incidente en el desgaste del flanco fue la velocidad de corte, seguido por el avance con p-valores menores de 0.05 a 95% de confiabilidad. También, determinaron que la profundidad de corte no era estadísticamente significativa.

## b) Rugosidad superficial Ra y Rz

En la tabla 6.9, que muestra los valores medios de señal-ruido para Ra, se observa que el parámetro más influyente en la rugosidad superficial es el avance radial final, seguido por la velocidad de generación, luego el avance radial inicial y por último la velocidad de corte. Las figuras 6.14 y 6.15 con los gráficos de efectos de las medias y de señal-ruido, indican que la rugosidad superficial es una función no lineal para todas las variables del proceso, Ra tiende a aumentar hasta el punto en que alcanza los 500 golpes/min, pasada esta velocidad de corte, Ra empieza a disminuir, lo mismo ocurre con el avance radial final y la velocidad de generación, a excepción del avance radial inicial, que tiende a disminuir en los niveles medios y luego empieza a aumentar. Este comportamiento indica que para disminuir la rugosidad es mejor utilizar los parámetros del nivel 1 y nivel 3. De acuerdo a los resultados del método Taguchi por medio del análisis de señal-ruido y el ANOVA, la combinación de parámetros de operación que ayudan a reducir u obtener una óptima rugosidad superficial Ra se detalla en la tabla 6.18:

Tabla 6.18 – Parámetros óptimos para la rugosidad Ra.

Velocidad de corte (golpe/min)	Avance radial inicial (mm/golpe)	Avance radial final (mm/golpe)	Velocidad de generación (mm/golpe)
300	0.014	0.002	1.50

Los parámetros óptimos de corte para disminuir la rugosidad equivalen a, reducir la velocidad de corte al mínimo nivel (300 golpes/min), disminuir el avance radial final a su mínimo nivel (0.002 mm/golpe), la velocidad de generación en su nivel mínimo (1.50 mm/golpe) y el avance radial inicial a su nivel medio (0.014 mm/golpe).

De acuerdo al ANOVA de la tabla 6.10, el porcentaje de contribución que tiene el avance radial final en la rugosidad es de 39.19%, la velocidad de generación un 21.97%, el avance radial inicial 19.76 y la velocidad de corte 19.08%. También, se puede concluir que los resultados del ANOVA son coherentes contra los del análisis de señal-ruido, confirmando que la variable que

más influye en la rugosidad es el avance radial final con  $p$ -valor de 0.314, este  $p$ -valor es muy bajo y se puede considerar como estadísticamente no significativo, pero a la vez informa que esa variable tiene una fuerte influencia en la rugosidad superficial y por esta razón se debe tomar en cuenta.

La figura 6.17 muestra el comportamiento de la rugosidad Ra con los valores experimentales frente a los valores teóricos obtenidos por medio de la ecuación 6.2, se determina que es aceptable a aproximación de ambos modelos con un porcentaje de error de 7.58%. El valor de predicción propuesto por el método Taguchi para la rugosidad es de 3.66  $\mu\text{m}$ , con un intervalo de confianza de  $\pm 1.47 \mu\text{m}$ . Esto quiere decir que Ra luego de una prueba de confirmación podría tomar cualquier valor entre el siguiente rango,  $2.19 \leq \text{Ra} (\mu\text{m}) \leq 5.14$ .

De la tabla 6.11, que muestra los valores medios de señal-ruido para  $R_z$ , se concluye que el parámetro más influyente es el avance radial final, seguido por la velocidad de corte, luego el avance radial inicial y por último la velocidad de generación. Este resultado va cónsono frente a la rugosidad superficial  $R_a$ , a diferencia de que la velocidad de corte es la segunda variable más influyente. Esto demuestra que ambas rugosidades se ven afectadas en su mayoría por la misma variable, como lo muestra la figura 6.29.

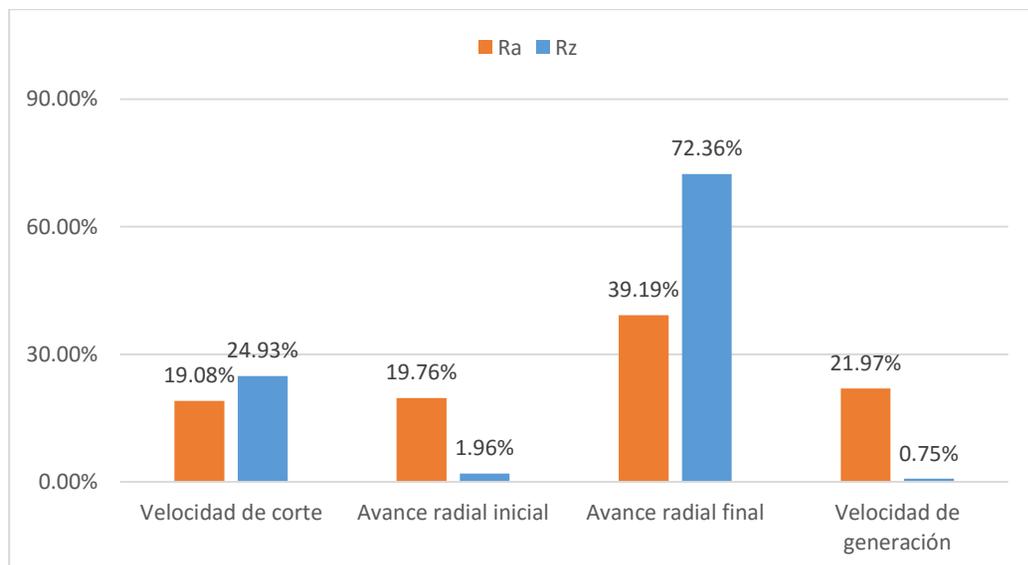


Figura 6.29 – Influencia de la variables de control sobre Ra y Rz.

Las figuras 6.18 y 6.19 con los gráficos de efectos de las medias y de la señal-ruido, indican que,  $R_z$  disminuye a medida que la velocidad de corte aumenta hasta 500 golpes/min y luego tiende a aumentar ligeramente, también  $R_z$  tiende a aumentar a medida que el avance radial final aumenta hasta llegar a 0.004 mm/golpe, desde este punto por cada incremento del avance radial final,  $R_z$  empieza a disminuir. Se puede apreciar que tanto la velocidad radial inicial como la velocidad de generación tienen pendiente mínimas, esto demuestra que no tiene tanta influencia en la rugosidad superficial  $R_z$ . De acuerdo a los resultados del método Taguchi por medio del análisis de señal-ruido y el ANOVA, la combinación de parámetros de operación que ayudan a reducir u obtener una óptima rugosidad superficial  $R_z$  se indican en la tabla 6.19:

Tabla 6.19 – Parámetros óptimos para la rugosidad  $R_z$ .

Velocidad de corte (golpe/min)	Avance radial inicial (mm/golpe)	Avance radial final (mm/golpe)	Velocidad de generación (mm/golpe)
500	0.014	0.010	1.50

Los parámetros óptimos de corte para disminuir la rugosidad equivalen a, disminuir la velocidad de corte al nivel medio (500 golpes/min), aumentar el avance radial final a su máximo nivel (0.010 mm/golpe), la velocidad de generación en su nivel mínimo (1.50 mm/golpe) y el avance radial inicial a su nivel medio (0.014 mm/golpe).

De acuerdo al ANOVA de las tablas 6.12, el porcentaje de contribución que tiene el avance radial final en la rugosidad es de 71.85%, la velocidad de generación un 0.60%, el avance radial inicial 2.50 y la velocidad de corte 25.04%. También, se puede concluir que los resultados del ANOVA son coherentes contra los del análisis de señal-ruido, confirmando que la variable que más influye en la rugosidad es el avance radial final con un  $p$ -valor de 0.01.

La figura 6.21 muestra el comportamiento de la rugosidad  $R_z$  con los valores experimentales frente a los valores teóricos obtenidos por medio de la ecuación 6.3, se determina que es aceptable la aproximación de ambos modelos

con un porcentaje de error de 4.53%. El valor de predicción propuesto por el método Taguchi para la rugosidad es de  $11.58 \mu\text{m}$ , con un intervalo de confianza de  $\pm 0.49 \mu\text{m}$ . Esto quiere decir que Rz luego de una prueba de confirmación podría tomar cualquier valor entre el siguiente rango,  $11.08 \leq Rz (\mu\text{m}) \leq 12.07$ .

Los resultados de rugosidad superficial van cónsonos a otros estudios como el de Yang y Tarng (Yang & Tarng, 1998), donde reportaron que la velocidad, el avance y la profundidad de corte son significativos, pero, el avance tiene la mayor incidencia en la rugosidad superficial, también observaron que la velocidad de giro tiene un efecto moderado, mientras la profundidad de corte no tiene influencia significativa. A su vez Hascalik y Caydas (Hascalik & Caydas, 2008) determinaron que el avance es el factor de mayor importancia sobre la rugosidad superficial, siendo 1.72 veces más influyente que el segundo parámetro más influyente. Princy y Ojha (Princy & Ojha, 2015) por medio del ANOVA determinaron los porcentajes de contribución en un proceso de torneado dando como resultado que el factor más influyente en la rugosidad superficial fue el avance con un 33.70%, seguido de la profundidad de corte con un 33.59% y por último, la velocidad de corte con un 31.20%. Esto puede ser explicado debido a que la rugosidad superficial es una función del avance y el radio de la nariz del cortador, por ende el avance debería ser siempre el factor más influyente en la rugosidad superficial.

### **c) Tiempo de maquinado**

De la tabla 6.13, que muestra los valores medios de señal-ruido para el tiempo, se observa que la variable más influyente es la velocidad de corte, seguido del avance radial final, luego el avance radial inicial y por último la velocidad de generación. Las figuras 6.22 y 6.23, muestran que el tiempo es una función casi lineal incremental de la velocidad de corte, es decir, a medida que la velocidad de corte aumenta, el tiempo de maquinado disminuirá. El tiempo de maquinado es inversamente proporcional a la velocidad de corte. Si deseamos maquinar más piezas debemos incrementar la velocidad de corte, pero hay que tener mucho cuidado con las otras características como la rugosidad superficial

y el desgaste, que como se observó en los análisis anteriores se ven afectados por la altas velocidades. De acuerdo a los resultados del método Taguchi por medio del análisis de señal-ruido y el ANOVA, la combinación de parámetros de operación que ayudan a optimizar el tiempo de maquinado se muestra en la tabla 6.20:

*Tabla 6.20 – Parámetros óptimos para el tiempo de maquinado.*

Velocidad de corte (golpe/min)	Avance radial inicial (mm/golpe)	Avance radial final (mm/golpe)	Velocidad de generación (mm/golpe)
700	0.020	0.010	1.963

Los parámetros óptimos de corte para disminuir el tiempo de maquinado equivalen a, incrementar la velocidad de corte al nivel máximo (700 golpes/min), aumentar el avance radial final a su máximo nivel (0.010 mm/golpe), la velocidad de generación en su nivel medio (1.963 mm/golpe) y el avance radial inicial a su nivel máximo (0.020 mm/golpe).

De acuerdo al ANOVA de la tabla 6.14, el porcentaje de contribución que tiene la velocidad de corte en el tiempo es de 72.32%, la velocidad de generación un 2.29%, el avance radial inicial 3.98% y avance radial final 21.42%. También, se puede concluir que los resultados del ANOVA son coherentes contra los del análisis de señal-ruido, confirmando que la variable que más influye en el tiempo es la velocidad de corte con un  $p$ -valor de 0.031.

La figura 6.25 muestra el comportamiento del tiempo con los valores experimentales frente a los valores teóricos obtenidos por medio de la ecuación 6.4, se determina que no es aceptable la aproximación de ambos modelos ya que el porcentaje de error entre ambos es 12.66%. El valor de predicción propuesto por el método Taguchi para el tiempo de maquinado es de 19.21 s, con un intervalo de confianza de  $\pm 94.00 \mu\text{m}$ . Esto quiere decir que el tiempo de maquinado luego de una prueba de confirmación podría tomar cualquier valor entre el siguiente rango,  $-74.79 \leq \text{Tiempo (s)} \leq 113.22$ . Este intervalo de confianza

es muy alto y no da una aproximación muy segura, por lo tanto no puede ser tomado en cuenta.

#### d) Geometría

De la tabla 6.15, que muestra los valores medios de señal-ruido para la geometría, se observa que el parámetro más influyente es la velocidad de generación, seguido por el avance radial inicial, luego la velocidad de corte y por último la velocidad de generación. La figuras 6.26 y 6.27, muestran que la geometría tiende a salirse de la especificación a medida la velocidad de corte aumenta, de igual forma la velocidad de generación. De acuerdo a los resultados del método Taguchi por medio del análisis de señal-ruido y el ANOVA, la combinación de parámetros de operación que ayudan a optimizar la geometría del engranaje se indica en la tabla 6.21:

*Tabla 6.21 – Parámetros óptimos para la geometría de engranaje.*

Velocidad de corte (golpe/min)	Avance radial inicial (mm/golpe)	Avance radial final (mm/golpe)	Velocidad de generación (mm/golpe)
700	0.010	0.010	1.963

Los parámetros óptimos de corte para la geometría del engranaje equivalen a, incrementar la velocidad de corte al nivel máximo (700 golpes/min), aumentar el avance radial final a su máximo nivel (0.010 mm/golpe), la velocidad de generación en su nivel medio (1.963 mm/golpe) y el avance radial inicial a su nivel mínimo (0.010 mm/golpe).

De acuerdo al ANOVA de la tabla 6.16, el porcentaje de contribución que tiene la velocidad de corte en la geometría es de 20.53%, la velocidad de generación un 35.49%, el avance radial inicial 29.94% y avance radial final 14.04%. También, se puede concluir que los resultados del ANOVA son coherentes contra los del análisis de señal-ruido, confirmando que la variable que más influye en la geometría es la velocidad de generación con un  $p$ -valor de 0.283. Este valor es muy alto por lo tanto no se considera estadísticamente influyente, pero puede deberse a que este análisis se realizó mediante la fusión

de los dos valores de resultados de la geometría del perfil izquierdo y derecho del engranaje por medio del análisis Grey. Debido a esto, tampoco se puede realizar una regresión lineal para conocer que ecuación predice el comportamiento de la geometría. Este análisis da una idea de cuáles son las variables que influyen en el proceso y la geometría.

El método Taguchi y el ANOVA demostraron ser una metodología simple, sistemática y eficiente de optimización, por medio del cual se pudo conocer cuáles son las variables influyentes del proceso de maquinado, reduciendo la cantidad de experimentos en comparación a un diseño de experimentos factorial u otros diseños de experimentos utilizados actualmente. Por otra parte el método logra ser una herramienta importante para conocer los modelos matemáticos que representan el comportamiento de las variables de salida. El método Taguchi podría ser fácilmente utilizado para cualquier tipo de problemas relacionados con la industria de la manufactura, donde se desee realizar una optimización o simplemente conocer el estado actual del proceso de una manera científica.

# CAPITULO VII

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 7.1 Conclusiones

En este estudio, el método Taguchi y el ANOVA fueron utilizados para optimizar el desgaste de la herramienta y otras respuestas del proceso de tallado de engranajes CNC. Se empleó un arreglo ortogonal  $L_9 (3^4)$  para el diseño de experimentos. Los parámetros de control utilizados, fueron la velocidad de corte, el avance radial inicial, el avance radial final y velocidad de generación. Como se muestra en este estudio, el método Taguchi provee una metodología eficiente para la optimización de parámetros de corte, con menos efectos de los que serían necesarios con otros métodos de optimización. Esta metodología también disminuye el número de pruebas experimentales, por lo tanto, existe una reducción de costos y de tiempo en cualquier proyecto. De los resultados obtenidos se pueden extraer las siguientes conclusiones:

1. El desgaste de la herramienta aumenta con el incremento de la velocidad de corte, pero no así con el avance radial inicial, el avance radial final y la velocidad de generación.
2. Por medio del ANOVA se pudo concluir que el parámetro de corte que más influye en el desgaste de la herramienta es la velocidad de corte, con un porcentaje de contribución de 87.60%, este es un punto muy importante a

tomar en cuenta a la hora de querer disminuir el desgaste. El parámetro que más influye en las rugosidades superficiales  $R_a$  y  $R_z$  es el avance radial final con un porcentaje de contribución de 39.01% y 72.36% respectivamente. El parámetro que más influye en el tiempo de maquinado es la velocidad de corte con 72.32% de contribución. Y la geometría se ve afectada en su mayoría por dos factores, la velocidad de generación y el avance radial inicial, con un porcentaje de contribución de 35.49% y 29.94% respectivamente.

3. Los parámetros óptimos propuestos por el método Taguchi para minimizar el desgaste de la herramienta son los siguientes: velocidad de corte = 300 golpes/min, avance radial inicial = 0.020 mm/golpe, avance radial final = 0.010 mm/golpe y una velocidad de generación = 1.963 mm/golpe.
4. Los parámetros óptimos propuestos por el método Taguchi para minimizar la rugosidad superficial  $R_a$  son los siguientes: velocidad de corte = 300 golpes/min, avance radial inicial = 0.014 mm/golpe, avance radial final = 0.002 mm/golpe y una velocidad de generación = 1.50 mm/golpe.
5. Los parámetros óptimos propuestos por el método Taguchi para minimizar la rugosidad superficial  $R_z$  son los siguientes: velocidad de corte = 500 golpes/min, avance radial inicial = 0.014 mm/golpe, avance radial final = 0.010 mm/golpe y una velocidad de generación = 1.50 mm/golpe.
6. Los parámetros óptimos propuestos por el método Taguchi para minimizar el tiempo de maquinado son los siguientes: velocidad de corte = 700 golpes/min, avance radial inicial = 0.020 mm/golpe, avance radial final = 0.010 mm/golpe y una velocidad de generación = 1.963 mm/golpe.
7. Los parámetros óptimos propuestos por el método Taguchi para mejorar la geometría del engranaje son los siguientes: velocidad de corte = 700 golpes/min, avance radial inicial = 0.010 mm/golpe, avance radial final = 0.010 mm/golpe y una velocidad de generación = 1.963 mm/golpe.
8. Se logró obtener un modelo matemático para cada variable de salida, por medio de la regresión lineal, el modelo representa la relación entre los

parámetros de corte y el desgaste de la herramienta, las rugosidades superficiales  $R_a$  y  $R_z$ , y tiempo de maquinado.

9. El rango de predicción para el desgaste de herramienta es:  $13.3638 < \text{Desgaste } (\mu\text{m}) < 28.8539$ ; el rango de predicción para la rugosidad superficial  $R_a$  es  $2.1906 < R_a (\mu\text{m}) < 5.1411$ ; el rango de predicción para la rugosidad superficial  $R_z$  es  $11.0881 < R_z (\mu\text{m}) < 12.0740$  y el rango de predicción para el tiempo de maquinado es  $-74.7900 < T \text{ (segundos)} < 113.2278$ .
10. Se logró comprender de manera científica la forma en que los parámetros de corte afectan a las variables de salida, en resumen, las variables más críticas del proceso de tallado de engranajes a tener en cuenta son la velocidad de corte y los avances radiales, la velocidad de generación no es tan influyente pero no por esto se debe descuidar.

## 7.2 Recomendaciones

La experimentación fue realizada bajo condiciones específicas de velocidades de corte, avances radiales y velocidades de generación, y aunque los resultados arrojados en el desarrollo de las mediciones proporcionan una visión general del comportamiento del desgaste de herramienta, la rugosidad superficial, el tiempo de maquinado y la geometría del engranaje, esto no significa que siempre se presente el mismo comportamiento. Para esto se sugiere la realización posterior de experimentos, en los que se varíen más parámetros involucrados, como el tipo de herramienta, de maquinado, y lubricante.

Los modelos matemáticos propuestos fueron cotejados frente a las pruebas experimentales, en caso de que se desee predecir el comportamiento de alguna de las características de salida fuera de los rangos de operación utilizados en este estudio, no es seguro que los resultados sean completamente confiables.

Este estudio comprende únicamente el análisis y predicción de las variables de salida, posteriormente se recomienda realizar un juego de pruebas experimentales para confirmar los resultados presentados.

Con los resultados obtenidos en este estudio, se recomienda realizar una investigación posterior, tomando en cuenta otras variables de control y realizar una optimización general de una sola respuesta por medio de un método multi-objetivo como por ejemplo: algoritmo genético, análisis relacional Grey, sistema neuro difuso o redes neuronales.

# REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Aramesh, M., Attia, M. H., Kishawy, H. A., & Balazinski, M. (2016). Estimating the remaining useful tool life of worn tools under different cutting parameters: A survival life analysis during turning of titanium metal matrix composites (Ti-MMCs). *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 35-43.
- Athreya, S., & Venkatesh, Y. (2012). Application Of Taguchi Method For Optimization Of Process Parameters in Improving the Surface Roughness of the Lathe Operation. *International Refereed Journal of Engineering and Science*, 13-19.
- Ayed, Y., Germain, G., Ammar, A., & Furet, B. (2015). Tool wear analysis and improvement of cutting conditions using the high-pressure water-jet assistance when machining the Ti17 titanium alloy. *Precision Engineering*, 1-8.
- Bangalore, H. M. (2008). *Production Technology*. Nueva Delhi: Tata McGraw-Hill.
- Banglong, L. (2014). *Industrial Technology Reasearch Institute*. Retrieved from [https://www.itri.org.tw/chi/WebTools/Thumbnail.ashx?SiteID=1&MmmID=620622504225221545&fd=MSGPic\\_Pics&Pname=%E5%BE%B7%E5%9C%8BKLINGELNBERG\\_P65%E9%BD%92%E8%BC%AA%E9%87%8F%E6%B8%AC%E5%84%80.jpg](https://www.itri.org.tw/chi/WebTools/Thumbnail.ashx?SiteID=1&MmmID=620622504225221545&fd=MSGPic_Pics&Pname=%E5%BE%B7%E5%9C%8BKLINGELNBERG_P65%E9%BD%92%E8%BC%AA%E9%87%8F%E6%B8%AC%E5%84%80.jpg)
- Boothroyd, G., & Knight, W. (1989). *Fundamentals of Machining and Machine Tools*. New York: Marcel Dekker, Inc.
- Bordin, A., Bruschi, S., Ghiotti, A., & Bariani, P. (2015). Analysis of tool wear in cryogenic machining of additive manufactured Ti6Al4V alloy. *Wear*, 89-99.
- Calva Cumbicus, J. M., & Helguero Alcívar, C. G. (n.d.). Analisis del tiempo de vida de una herramienta de corte para el maquinado del acero AISI D6, mediante el uso de la ecuacion de Taylor y criterios de desgaste. *Escuela Superior Politecnica del Litoral*, 1-8.
- Campos, P., Ferreira, J., de Paiva, A., Balestrassi, P., & Davim, J. (2013). Modeling and optimization techniques in machining hardened steels: a brief review. *Review on Advanced Materials Science Vol. 34*, 141-147.
- Cantero, J. L., Díaz-Álvarez, J., Miguélez, M. H., & Marín, N. C. (2013). Analysis of tool wear patterns in finishing turning of Inconel 718. *Wear*, 885-894.
- Cerce, L., Pusavec, F., & Kopac, J. (2015). 3D cutting tool wear monitoring in the process. *Journal of Mechanical Science and Technology Vol. 29*, 3885-3895.
- Cook, N. (1973). Tool Wear and Tool Life. *Journal of Eng ineering of Industry*, 931-938.
- Correa, J. A. (n.d.). *Campus Virtual del Consejo de Educación Técnico Profesional*. Retrieved from Universidad del Trabajo del Uruguay: <http://campusvirtual.edu.uy/archivos/mecanica->

general/MATERIAL%20BIBLIOGRAFICO%20TECNICO%20PARA%20APOYO%20DOCENTE /Material%20Didactico/tecnologia-de-corte\_parte-2.pdf

- Cubberly, W. H., & Bakerjian, R. (1989). *Tool and Manufacturing Engineers Handbook*. Dearborn: McGraw-Hill in cooperation of Society of Manufacturing Engineers.
- Davoodi, B., & Eskandari, B. (2015). Tool wear mechanisms and multi-response optimization of tool life and volume of material removed in turning of N-155 iron–nickel-base superalloy using RSM. *Measurement* 68, 286-294.
- Escamilla, I. (2004). *Optimización de las variables envueltas en el maquinado en un torno de control numerico computarizado*. San Nicolas de los Garza: Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Estandarización, N. I. (1994). *Techincal Data - Surface Roughness*. Ginebra, Suiza.
- Gaitonde, V., Karnik, S., Figueira, L., & Davim, J. P. (2009). Analysis of machinability during hard turning of cold work tool steel (Type: AISI D2). *Materials and Manufacturing Processes Vol. 24*, 1373-1382.
- Gear, A. (2016). *BearingKit.com*. Retrieved from <http://www.bearingkit.com/SM465-Main-Shaft-4wd-10-Spline-p/awt304-2c.htm>
- Gonzalez, B. (2004). *Optimización de las variables envueltas en el maquinado en un centro de maquinado de control numérico por computadora*. San Nicolas de los Garza: Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Gopalakrishnan, B., & Kahyyal, F. (1991). Machine parameter selection for turning with constraints: An analytical approach based on geometric programming. *International Journal of Production Reasearch*, 1897-1908.
- Groover, M. P. (2007). *Fundamentos de Manufactura Moderna*. Ciudad de México: McGraw-Hill Interamericana.
- Gupta, M., & Kumar, S. (2015). Investigation of surface roughness and MRR for turning of UD-GFRP using PCA and Taguchi method. *Engineering Science and Technology, an International Journal* 18, 70-81.
- Gupta, M., Singh, G., & Sood, P. (2015). Modelling and Optimization of Tool Wear in Machining of EN24 Steel Using Taguchi Approach. *Journal of Institute of Engineers*, 1-9.
- Hascalik, A., & Caydas , U. (2008). Optimization of turning parameters for surface roughness and tool life based on the Taguchi method. *International Journal of Advanced Manufacture Technology* 38, 896-903.
- Haykin, S. (2008). *Neural Netowoks and Learning Machines*. New Jersey: Pearson Prentice Hall.
- Holland, J. H. (1992). *Adaptation in natural and artificial systems* (Second edition ed.). MIT Press.
- Industria automotriz hacia el 2020. (2016, Enero). *Indicador Automotriz Vol.267*, 4-5.

- Jang, J.-S. (1993). ANFIS: adaptive-network-based fuzzy inference system. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics Vol. 23*, 665-685. doi:10.1109/21.256541
- Janninck, W. (1990). Shaper Cutters - Design and Application - Part 2. *Gear Technology*, 38-45.
- Jindal, A. (2012). Analysis of Tool Wear Rate in Drilling Operation using Scanning Electron Microscope (SEM). *Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering 11*, 43-54.
- Kabakli, E. (2009). OPTIMIZATION OF PROCESS PARAMETERS OF DRILLING USING THE TAGUCHI METHOD. Adana, Cukurova: Institute of Natural and Applied Sciences .
- Kishawy, H., Pang, L., & Balazinski, M. (2011). Modeling of tool wear during hard turning with self-propelled rotary tools. *International Journal of Mechanical Sciences Vol. 53*, 1015-1021.
- Krishnaiah, K., & Shahabudeen, P. (2012). *Applied Design of Experiments and Taguchi Methods*. Nueva Delhi: PHI Learning Private Limited .
- Krishnakumar, P., Rameshkumar, K., & Ramachandran, K. I. (2015). Tool Wear Condition Prediction Using Vibration Signals in High Speed Machining (HSM) of Titanium (Ti-6Al-4V) Alloy. *Procedia Computer Science 50*, 270-275.
- Krolczyk, G. M., Nieslony, P., & Legutko, S. (2014). Determination of tool life and research wear during duplex stainless steel turning. *Archive of Civil and Mechanical Engineering*, 1-8.
- Kumar, A. K., & Pradhan, S. (2013). Modeling and optimization of Al/SiCp MMC machining using Taguchi approach. *Measurement 46*, 3064-3072.
- Lan, T.-S. (2010). Tool Wear Optimization for General CNC Turning Using Fuzzy Deduction. *Scientific Research*, 1019-1025.
- Lange, J. (1994). Innovative CNC Gear Shaping. *Gear Technology*, 16-28.
- Lange, J. M. (1985). Gear Shaping Machines CNC Development. *Gear Technology*, 38-46.
- Maiuri, T. (2009). Hob Tool Life Technology Update. *Gear Technology*, 50-59.
- Manková, I., Kovac, P., Beno, J., & Kundrak, J. (2011). *Journal of Production Engineering Vol. 14*, 17.
- Matweb*. (n.d.). Retrieved from [www.matweb.com](http://www.matweb.com)
- Mcneil, I. (2002). *An Encyclopedia of the History of Technology*. Londres: Routledge.
- Meseguer Valdenebro, J. (2014). Estudio numérico y experimental del proceso de soldeo MIG sobre la aleación 6063-T5 utilizando el método de Taguchi. *Tesis doctoral*, 40.
- Muñoz-Escalona, P., Díaz, N., & Cassier, Z. (2012). Prediction of Tool Wear Mechanisms in Face Milling AISI 1045 Steel. *Journal of Materials Engineering and Performance 21*, 797-808.
- Normung, D. I. (1990). *DIN 4768-1*. Berlín-Tiergarten: DIN.

- Oberg, E., Jones, F., Horton, H., & Ryffel, H. (2008). *Machinery's Handbook 28th Edition*. New York: Industrial Press Inc.
- Pogacnik, M., & Kopac, J. (2000, Febrero 1). Dynamic stabilization of the turn-milling process by parameter optimization. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 127-135. doi:10.1243/0954405001517504
- Prasad, A., Rao, P., & Rao, U. (1997). Optimal selection of process parameters for turning operations in a CAPP system. *International Journal of Production Research Vol. 35*, 1495-1522.
- Princy, J., & Ojha, R. (2015). OPTIMIZATION OF MACHINING PARAMETERS ON SURFACE ROUGHNESS BY TAGUCHI APPROACH. *International Journal of Information Research and Review 2*, 1181-1187.
- Qasim, A., Nisar, S., Shah, A., Khalid, M. S., & Sheikh, M. A. (2015). Optimization of process parameters for machining of AISI-1045 steel using Taguchi design and ANOVA. *Simulation Modelling Practice and Theory 59*, 36-51.
- Quezada, F., & Mariño, Á. (2006). Recubrimientos de TiAlN sobre acero ASTM A36 por el proceso de sputtering reactivo RFPY. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de AntioquiaVL*, 107-114.
- Rakshit, D. (1989). *Optimum Design of Gear Shaper Cutters*. Edmonton, Alberta, Canadá.
- Ramirez Tamayo, Z. (2015, abril 15). *Forbes México*. Retrieved from <http://www.forbes.com.mx/de-verdad-mexico-es-importante-en-la-industria-automotriz/>
- Rao Venkata, K., Murthy, B., & Rao Mohan, N. (2014). Prediction of cutting tool wear, surface roughness and vibration of work piece in boring of AISI 316 steel with artificial neural network. *Journal of the International Measurement Confederation Vol. 51*, 63-70.
- Rao, P. (2009). *Manufacturing Technology Vol. 2*. New Delhi: Tata McGraw-Hill.
- Rueda, S. (2015, Marzo). *Slideplayer*. Retrieved from <http://slideplayer.es/slide/2319258/>
- Selvaraj, P. D., Chandramohan, P., & Mohanraj, M. (2014). Optimization of surface roughness, cutting force and tool wear of nitrogen alloyed duplex stainless steel in a dry turning process using Taguchi method. *Measurement 49*, 205-215.
- Shahrom, M. S., Yahya, N. M., & Yusoff, A. R. (2013). Taguchi Method Approach on Effect of Lubrication Condition on Surface Roughness in Milling Operation. *Procedia Engineering 53*, 594-599.
- Shin, Y., & Joo, Y. (1992). Optimization of machining conditions with practical constraints. *International Journal of Production Research Vol. 30*, 2907-2919.
- Sidda Reddy, B., Suresh Kumar, J., & Vijaya Kumar Reddy, K. (2009). Prediction of Surface Roughness in Turning Using Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System. *Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering*, 252-259.

- Soporte de Minitab 17*. (2015). Retrieved from <http://support.minitab.com/es-mx/minitab/17/topic-library/modeling-statistics/anova/basics/what-is-anova/>
- Sulzer, G. (1986). CNC Gear Shaping. *Gear Technology*, 16-23.
- Tsao, C. C. (2009). Grey–Taguchi method to optimize the milling parameters of aluminum alloy. *International Journal of Advanced Manufacture Technology*, 41-48.
- Wen-Yao, L., Chung-Biau, T., & Yi-Cheng, C. (2000). Spur gear generation by shaper cutters. *Journal of Materials Processing Technology* 104, 271-279.
- Winslow Taylor, F. (1907). *On the Art of Cutting Metals*. American Society of Mechanical Engineers.
- Yamamoto, H. (2016, Enero 27). *Introduction to Machine Tools Used in Gear Processing*. Retrieved from Yanmar Corporation Web site: [https://www.yanmar.com/us/technology/technical\\_review/2016/0127\\_4.html](https://www.yanmar.com/us/technology/technical_review/2016/0127_4.html)
- Yang, W. H., & Tarnq, Y. (1998). Design optimization of cutting parameters for turning operations based on the Taguchi method. *Journal of Materials Processing Technology* 84, 122-129.
- Youssef, H. A., & El-Hofy, H. (2008). *Machine Technology: Machine Tools and Operations*. Florida: CRC Press.

# LISTADO DE FIGURAS

Figura 1.2 – Estructura general de la tesis magistral. ....	7
Figura 2.1 – Cortador de una talladora de engranajes.....	10
Figura 2.2 – Talladora de engranaje “vieja escuela” – Sistema de retroceso en la mesa de trabajo (Lange J. M., 1985). ....	11
Figura 2.3 – Talladora de engranajes moderna – Sistema de retroceso en el husillo (Lange J. M., 1985).....	12
Figura 2.4 – Acción generadora de un cortador de talladora (Bangalore, 2008). .....	13
Figura 2.5 – Principio de trabajo de una talladora al realizar un engranaje recto (Bangalore, 2008). ....	14
Figura 2.6 – Proceso de tallado de engranajes en maquina convencional (Rakshit, 1989).....	15
Figura 2.7 – Principio de trabajo de una talladora al realizar un engranaje helicoidal (Lange J. , 1994). ....	16
.....	17
Figura 2.8 – Movimiento de alivio en el cortador (Rakshit, 1989). ....	17
Figura 2.9 – Tallado de engranaje en pieza con hombro adyacente (Youssef & El-Hofy, 2008). ....	18
Figura 2.10 – Tipos más comunes de cortadores (Rakshit, 1989).....	19
Figura 2.11 – Nomenclatura de las partes de un cortador – $S_w$ = espesor del diente, $h_a$ = addendum, $h_f$ = dedendum, $h$ = profundidad de diente, $d$ = diámetro del centro, $d_2$ = diámetro del avellanado, $d_f$ = diámetro de la raíz, $d_g$ = circulo base, $d_o$ = diámetro del paso, $d_A$ = diámetro exterior, $c_p$ = paso circular, $b$ = ancho de diente, $b_w$ = espesor de malla, $\eta$ = angulo de la cara de corte, $\nu$ = ángulo de la raíz, $\xi$ = ángulo del flanco (Bangalore, 2008). ....	20
Figura 2.12 – Formas comunes de los dientes en los cortadores (Cubberly & Bakerjian, 1989). ....	21
Figura 2.13 – Dimensiones importantes de un cortador (Rakshit, 1989). ....	22
Figura 2.14 – Re-afilado de un cortador (Rakshit, 1989). ....	23

Figura 2.15 – Ejes de movimiento de una talladora de engranajes CNC (Sulzer, 1986).....	25
Figura 3.1 – Regiones de desgaste de herramienta en el maquinado de metales (Boothroyd & Knight, 1989).....	29
Figura 3.2 – Desgaste del flanco y desgaste por cráter (Groover, 2007).....	31
Figura 3.3 – Relación general de desgaste de la herramienta contra el tiempo de corte (Groover, 2007).....	32
Figura 3.4 - Efecto de los factores geométricos en la determinación del acabado teórico sobre una superficie de trabajo para herramientas de punta sencilla: a) efecto del radio de la nariz, b) efecto del avance y c) efecto del ángulo del filo de corte frontal (AFCF). ....	46
Figura 3.5 – a) Curva P (perfil de rugosidad sin filtrar y b) Curva R (perfil de rugosidad) (Escamilla, 2004). ....	48
Figura 3.6 – Línea media en la toma de medidas de la rugosidad (Escamilla, 2004).....	49
Figura 3.7 – Definición de $R_a$ , rugosidad promedio (Escamilla, 2004). ....	50
Figura 3.8 – Definición de $R_z$ , Promedio de las altura de pico a valle en cinco mediciones (Escamilla, 2004). ....	50
Figura 3.9 – Definición de $R_z$ bajo la norma DIN (Escamilla, 2004). ....	51
Figura 3.10 – Craterización a) lubricación convencional, b) 100 bar, c) 250 bar (Ayed, Germain, Ammar, & Furet, 2015). ....	53
Figura 3.11 – a) Tipo de desgaste primario en seco, b) Desgaste de tipo muesca en seco (Cantero, Díaz-Álvarez, Miguélez, & Marín, 2013).....	54
Figura 3.12 – a) Imagen MEB de la herramienta a $V_c = 70$ m/min, b) Imagen MEB de la herramienta a $V_c = 50$ m/min, c) Imagen MEB de la herramienta a $V_c = 90$ m/min. $V_c =$ velocidad de corte (Davoodi & Eskandari, 2015). ....	56
Figura 4.1 – Técnicas de optimización utilizadas por varios investigadores. ....	60
Figura 4.2 – Técnicas que componen el Método Taguchi .....	67
Figura 4.3 – Ilustración de una gráfica de respuesta (Krishnaiah & Shahabudeen, 2012). ....	73
Figura 5.1 – Talladora de engranajes. ....	82

Figura 5.2 – Cortador tipo disco para talladora de engranajes marca Gleason.	84
Figura 5.3 – Estereoscopio marca Zeiss.....	86
Figura 5.4 – Máquina de medición por coordenadas P65 (Banglong, 2014). ....	87
Figura 5.5 – Diagrama de flujo del método experimental.....	90
Figura 5.6 – Uso del estereoscopio para referenciación de un cortador sin utilizar. ....	91
Figura 5.7 – Medición de la altura de un cortador por medio de un reloj de caratula. ....	92
Figura 5.8 – Sección de corte en la probeta de ensayo.....	93
Figura 5.9 – Arreglo cortador pieza dentro de la talladora de engranajes, en el cuadro en rojo se muestra el engranaje maquinado. ....	94
Figura 5.10 – Medición de la geometría por medio de la MMC.....	95
Figura 5.11 – Secciones de medición del cortador mediante el estereoscopio.	96
Figura 5.12 – Área de obtención de imágenes mediante el estereoscopio.....	97
Figura 5.13 – a) cortador sin utilizar a 8.0X; b) imagen de cortador ya utilizado a 8.0 X. ....	97
Figura 6.1 – Histograma del incremento del desgaste vs la velocidad de corte. ....	102
Figura 6.2 – a) Craterización en el experimento #1, b) Craterización en el experimento #4, c) Craterización en el experimento #7 y d) Craterización en el experimento #8. ....	103
Figura 6.3 – Comportamiento del desgaste en el diente del cortador.....	103
Figura 6.4 – Rugosidad superficial Ra vs avance radial final.....	105
Figura 6.5 – Rugosidad superficial Rz vs avance radial final.....	105
Figura 6.6 – Velocidad de corte vs tiempo de maquinado. ....	106
Figura 6.7 – Acumulado del tiempo entre velocidades. ....	107
Figura 6.8 – Resultado de la geometría en la experimentación #3.....	108
Figura 6.9 – Resultado de la geometría en la experimentación #7.....	109
Figura 6.10 – Media de los valores medios del desgaste total. ....	111
Figura 6.11 – Media de las relaciones de señal-ruido del desgaste total.....	111

Figura 6.12 – Influencia de cada una de las variables para minimizar el desgaste. ....	113
Figura 6.13 – Desgaste de la herramienta experimental frente a la curva de desgaste ajustada. ....	114
Figura 6.14 – Media de los valores medios para Ra. ....	115
Figura 6.15 – Media de las relaciones de señal-ruido de Ra. ....	116
Figura 6.16 – Influencia de cada una de las variables para minimizar Ra. ....	117
Figura 6.17 – Ra experimental frente a la curva de Ra ajustada. ....	118
Figura 6.18 – Media de los valores medios para Rz. ....	119
Figura 6.19 – Media de las relaciones de señal-ruido de Rz. ....	120
Figura 6.20 – Influencia de cada una de las variables para minimizar Rz. ....	121
Figura 6.21 – Rz experimental frente a la curva de Rz ajustada. ....	122
Figura 6.22 – Media de los valores medios para el tiempo. ....	123
Figura 6.23 – Media de las relaciones de señal-ruido para el tiempo. ....	124
Figura 6.24 – Influencia de cada una de las variables para minimizar el tiempo. ....	125
Figura 6.25 – Tiempo experimental frente a la curva de tiempo ajustada. ....	126
Figura 6.26 – Media de los valores medios para la geometría. ....	127
Figura 6.27 – Media de las relaciones de señal-ruido de la geometría. ....	128
Figura 6.28 – Influencia de cada una de las variables para mejorar geometría. ....	129
Figura 6.29 – Influencia de la variables de control sobre Ra y Rz. ....	133

# LISTADO DE TABLAS

Tabla 1.1 – Industria proveedoras del sector automotriz (Ramirez Tamayo, 2015).....	2
.....	2
Tabla 3.1 – Tipos de materiales mayormente utilizados en herramientas de corte (Boothroyd & Knight, 1989).....	34
.....	34
Tabla 3.2 – Resumen de características según elemento químico (Escamilla, 2004).....	35
Tabla 3.3 – Propiedades de los recubrimientos utilizados hoy en día (Maiuri, 2009).....	40
Tabla 3.4 - características de generales de los fluidos de corte (Boothroyd & Knight, 1989).....	44
Tabla 4.1 – Comparación entre el método factorial completo y el arreglo ortogonal de Taguchi (Krishnaiah & Shahabudeen, 2012). ....	68
Tabla 4.2 – Arreglos ortogonales más comunes (Krishnaiah & Shahabudeen, 2012).....	68
Tabla 4.3 – Ejemplo de un arreglo ortogonal – los 1’s y 2’s indican el nivel de los factores alto y bajo, son 8 experimentos en total, cada columna tiene la misma cantidad de 1’s y 2’s, este arreglo ortogonal puede ser utilizado hasta ara siete factores (Krishnaiah & Shahabudeen, 2012). ....	69
Tabla 4.4 – Calculo del análisis de la varianza (ANOVA) .....	75
Tabla 5.1 – Composición química en % del DIN 25MoCr4 (Matweb, s.f.). ....	81
Tabla 5.2 – Propiedades físicas del DIN 25MoCr4 a temperatura ambiente (Matweb, s.f.). ....	81
Tabla 5.3 – Propiedades mecánicas del DIN 25MoCr4 (Matweb, s.f.).....	81
Tabla 5.4 – Características de la talladora de engranajes .....	83
Tabla 5.5 – Composición química en % del AISI M48 (Matweb, s.f.).....	84
Tabla 5.6 – Propiedades físicas del AISI M48 (Matweb, s.f.).....	84
Tabla 5.7 – Propiedades mecánicas del AISI M48 (Matweb, s.f.).....	85

Tabla 5.8 – Características del recubrimiento de TiAIN (Quezada & Mariño, 2006).....	85
Tabla 5.9 – Factores de control y factores de ruido del proceso de tallado de engranajes. ....	88
Tabla 5.10 – Variables y sus niveles.....	89
Tabla 5.11 – Matriz de experimentos del estudio, $L_9 (3^4)$ .....	89
Tabla 6.1 – Resultados de las mediciones del desgaste. ....	99
Tabla 6.2 – Medición del desgaste del flanco en el experimento #8.....	100
Tabla 6.3 – Medición del desgaste del flanco en el experimento #2.....	101
Tabla 6.4 – Resultados de la rugosidad superficial.....	104
Tabla 6.5 – Resultados de la medición del tiempo de maquinado. ....	106
Tabla 6.6 – Resultados de la medición de las geometrías del engranaje. ....	108
Tabla 6.7 – Tabla de respuestas de relación de señal- ruido para el desgaste de la herramienta. ....	110
Tabla 6.8 – ANOVA de medias para el desgaste de herramienta.....	112
Tabla 6.9 – Tabla de respuestas de relación señal- ruido para $R_a$ .....	114
Tabla 6.10 – ANOVA de medias para $R_a$ . ....	116
Tabla 6.11 – Tabla de respuestas de relación señal- ruido para $R_z$ .....	119
Tabla 6.12 – ANOVA de medias para $R_z$ . ....	121
Tabla 6.13 – Tabla de respuestas de relación señal- ruido para el tiempo de maquinado. ....	123
Tabla 6.14 – ANOVA de medias para el tiempo. ....	124
Tabla 6.15 – Tabla de respuestas de relación señal- ruido para la geometría. ....	127
Tabla 6.16 – ANOVA de medias para la geometría. ....	129
Tabla 6.17 – Parámetros óptimos para el desgaste de la herramienta.....	130
Tabla 6.18 – Parámetros óptimos para la rugosidad $R_a$ . ....	132
Tabla 6.19 – Parámetros óptimos para la rugosidad $R_z$ . ....	134
Tabla 6.20 – Parámetros óptimos para el tiempo de maquinado.....	136
Tabla 6.21 – Parámetros óptimos para la geometría de engranaje. ....	137