

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ÁREA DE POSGRADO
MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS E INGENIERÍA



***Análisis en la manufactura de superficies complejas a través del
diseño de experimentos.***

Que presenta para obtener el grado de MAESTRO EN INGENIERÍA MECÁNICA

TESIS

NOMBRE DEL SUSTENTANTE:
Ing. Héctor Jesús Aguilar Arreola

DIRECTOR DE TESIS:
Dr. Álvaro González Ángeles

MEXICALI, B.C.

FEBRERO 2018



ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	VIII
RESUMEN	IX
ABSTRACT.....	X
INTRODUCCIÓN	XI
HIPÓTESIS	XII
ALCANCE.....	XII
OBJETIVO GENERAL.....	XIII
OBJETIVO ESPECÍFICO.....	XIII
JUSTIFICACIÓN.....	XIV
CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES.....	1
ANTECEDENTES DE LAS TURBINAS	1
FUNCIONAMIENTO DE UNA TURBINA DE GAS	6
1.2.1 Ciclo termodinámico	6
1.2.2 Tipo de motores de turbina de gas	9
1.2.2.1 Motor turbo propulsor.	9
1.2.2.2 Motor turbo hélice	9
1.2.2.3 Motor turbo ventilador.....	10
1.2.3 Componentes principales de una turbina de gas	11
1.2.3.1 Compresor.....	11
1.2.3.2 Turbina.	13
1.2.3.3 Cámara de combustión	15
1.3 SOBREALIMENTACIÓN EN LOS MOTORES (TURBOCOMPRESOR).....	16
1.3.1 Antecedentes de la sobrealimentación.....	16
1.3.2 Sobrealimentación en motores de gasolina.....	16
1.3.3 Turbocompresor.	19



1.3.4 Funcionamiento del turbo	20
1.3.5 Turbocompresor de geometría fija	21
1.3.6 Sistema de regulación de la presión del turbo.....	22
1.3.7 Temperaturas de un turbo	23
1.3.8 Intercambiador de calor (Intercooler).....	24
1.3.9 Turbocompresor de geometría variable.....	25
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO	27
2.1 INTRODUCCIÓN AL MAQUINADO DE ALTA VELOCIDAD	27
2.2 TEORÍA DEL MAQUINADO.	29
2.3 TIPOS DE OPERACIONES DE MAQUINADO.	30
2.4 FRESADO	31
2.4.1 Tipos de fresas.....	32
2.4.2 Fresado periférico.....	33
2.4.3 Fresado frontal	34
2.4.4 Endmill.....	35
2.5 INTRODUCCIÓN AL FRESADO EN 5 EJES.	36
2.5.1 Estructura del fresado de 5 ejes.	36
2.5.2 Fresado 5 ejes con cortador hemisférico.....	39
2.5.3 Selección de las condiciones de corte.....	40
2.5.4 Fórmulas para calcular avance, velocidad de corte y velocidad de giro del husillo	42
2.5.5 Factores para selección de cortadores para aluminio	43
2.5.6 Fluidos para corte.....	44
2.5.7 Maquinabilidad.	46
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA.....	48
3.1 INTRODUCCIÓN.	48



Análisis en la manufactura de superficies complejas a través del diseño de experimentos



3.2 RUTA DE MAQUINADO GENERADA EN MASTERCAM PARA MAQUINAR ÁLABES PARA TURBOCOMPRESORES.	50
3.2.1 Proceso de desbaste de la pieza (Roughing)	50
3.2.2 Proceso de maquinado Swarf	57
3.2.3 Proceso de Acabado (Finish).	60
3.3 PROCESO DE FABRICACIÓN DE PREFORMAS	65
3.4 PROCESO DE FABRICACIÓN DE TURBOS O ALABES	68
3.5 METROLOGÍA DE LAS PIEZAS.....	71
3.6 MATERIALES Y EQUIPO.....	72
 CAPÍTULO 4. RESULTADOS.	73
4.1 EXPERIMENTACIÓN.....	73
4.2 MEDICIONES DE LAS PIEZAS	84
 CONCLUSIONES	88
RECOMENDACIONES	91
REFERENCIAS.....	93
ANEXOS	96



ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA	PÁGINA
FIG. 1.1 AEOLÍPILO DE HERO	1
FIG. 1.2 TURBINA DISEÑADA POR STOLZ EN 1872. (A) COMPRESOR AXIAL MULTITAPA, (B) TURBINA DE REACCIÓN MULTITAPA, (C) PRECALENTADOR DE AIRE DE ADMISIÓN CON LOS GASES DE ESCAPE	3
FIG. 1.3 TURBINA DE GAS EN CICLO ABIERTO (CICLO BRAYTON SIMPLE).....	6
FIG. 1.4 DIAGRAMAS T-S Y P-V DEL CICLO BRAYTON	7
FIG. 1.5 MOTOR DE TURBINA DE GAS DE CICLO CERRADO	8
FIG. 1.6 MOTOR TURBO PROPULSOR.....	9
FIG. 1.7 MOTOR TURBO HÉLICE	10
FIG. 1.8 MOTOR TURBO VENTILADOR	11
FIG. 1.9 COMPRESOR CENTRÍFUGO.....	12
FIG. 1.10 COMPRESOR AXIAL	13
FIG. 1.11 TURBINA FLUJO AXIAL.....	14
FIG. 1.12 TIPOS DE CÁMARA DE COMBUSTIÓN (A) TUBULAR, (B) ANULAR, (C) MIXTA	15
FIG. 1.13 CURVAS DE MOTOR ASPIRACIÓN NATURAL (ATMOSFÉRICO) VS SOBREALIMENTADO (TURBO).....	18
FIG. 1.14 EL TURBOCOMPRESOR.....	19
FIG. 1.15 FUNCIONAMIENTO DE UN TURBOCOMPRESOR	20
FIG. 1.16 ESTRUCTURA DE UN TURBOCOMPRESOR	21
FIG. 1.17 CIRCUITO DE ENGRASE DE UN TURBOCOMPRESOR	22
FIG. 1.18 VÁLVULA WASTEGATE EN EL TURBOCOMPRESOR	23
FIG. 1.19 TEMPERATURAS QUE SUFRE UN TURBOCOMPRESOR.....	24
FIG. 1.20 INTERCAMBIADOR DE CALOR EN EL TURBO (INTERCOOLER)	25
FIG.1.21 ESTRUCTURA DE UN TURBOCOMPRESOR DE GEOMETRÍA VARIABLE.....	26
FIG. 2.1 (A) SECCIÓN TRANSVERSAL DEL PROCESO DE MAQUINADO, (B) HERRAMIENTA DE CORTE	30
FIG. 2.2 LOS 3 TIPOS MÁS COMUNES DEL PROCESO DE MAQUINADO: (A) TORNEADO, (B) TALADRADO, (C) FRESADO PERIFÉRICO, (D) FRESADO DE FRENTE	31
FIG. 2.3 TIPOS DE OPERACIÓN DEL FRESADO A) FRESADO PERIFÉRICO B) FRESADO FRONTAL. 32	
FIG. 2.4 FRESADO PERIFÉRICO.....	33
FIG. 2.5 A) FRESADO DE OPOSICIÓN B) FRESADO DE CONCORDANCIA.....	34
FIG. 2.6 TIPOS DE FRESADO FRONTAL: (A) FRESADO CONVENCIONAL, (B) FRONTAL PARCIAL, (C) RANURADO, (D) PERFILADO, (E) CAVIDADES, (F) CONTORNO SUPERFICIAL	35
FIG. 2.7 ESTRUCTURA DE MÁQUINA 5 EJES CON MESA GIRATORIA	38
FIG. 2.8 ESTRUCTURA DE MÁQUINA 5 EJES CON ROTACIÓN EN LA HERRAMIENTA EN 2 EJES.	38



Análisis en la manufactura de superficies complejas a través del diseño de experimentos



FIG. 2.9 ESTRUCTURA DE MÁQUINA 5 EJES CON ROTACIÓN EN LA HERRAMIENTA Y ROTACIÓN EN LA PIEZA.....	38
FIG. 2.10 FRESADO ASCENDENTE LONGITUDINAL PARA 5 EJES	39
FIG. 3.1 INICIO DE LA PREPARACIÓN DE LA PIEZA PARA REALIZAR LAS OPERACIONES DE MANUFACTURA	50
FIG. 3.2 COMPROBACIÓN DE ALTURA DE PIEZA DE TRABAJO CON EL ADITAMENTO DE MONTAJE	51
FIG. 3.3 DEFINIENDO UNA HERRAMIENTA NUEVA	52
FIG. 3.4 VENTANA DE LA APLICACIÓN BLADE EXPERT EN LA SECCIÓN MULTIEJES.....	53
FIG. 3.5 DEFINIENDO CONDICIONES DE CORTE DE LA HERRAMIENTA.....	54
FIG. 3.6 DEFINIENDO EL PATRÓN DE CORTE EN LA PIEZA DE TRABAJO	54
FIG. 3.7 VENTANA DE DEFINICIÓN DE LA PARTE DE TRABAJO.....	55
FIG. 3.8 ENLACE DEL MAQUINADO PARA LOS ÁLABES DEL TURBO	56
FIG. 3.9 ENLACE DEL MAQUINADO PARA EL CUERPO DEL TURBO.....	56
FIG. 3.10 VENTANA DE LA APLICACIÓN SWARF MILLING EN LA SECCIÓN DE MULTIEJES.....	57
FIG. 3.11 DEFINIENDO CONDICIONES DE CORTE PARA LOS ÁLABES	58
FIG. 3.12 DEFINIENDO EL PATRÓN DE CORTE DE LOS ÁLABES	59
FIG. 3.13 DEFINIENDO EL CONTROL DEL EJE DE LA HERRAMIENTA	59
FIG. 3.14 DEFINIENDO LOS MULTICORTES DE LOS ÁLABES DE LA PIEZA.....	60
FIG. 3.15 DEFINIENDO CONDICIONES DE CORTE PARA EL ACABADO DE LA PIEZA DE TRABAJO....	61
FIG. 3.16 DEFINIENDO PATRÓN DE CORTE PARA EL ACABADO DE LA PIEZA	62
FIG. 3.17 VERIFICACIÓN DE LA RUTA DE MAQUINADO DEL PROCESO DE DESBASTE (BLADE EXPERT)	63
FIG. 3.18 VERIFICACIÓN DE LA RUTA DE MAQUINADO DEL FRESADO SWARF PARA LOS ALABES..	64
FIG. 3.19 PIEZA CAREADA PARA FABRICAR PREFORMAS	65
FIG. 3.20 ADITAMENTO DE MONTAJE PARA PREPARACIÓN DE PREFORMAS PARA LOS TURBOS. .	66
FIG. 3.21 PIEZA MONTADA EN EL ADITAMENTO DE MONTAJE PARA FABRICACIÓN DE PREFORMA.	66
FIG. 3.22 PREFORMA TERMINADA PARA MAQUINADO DE TURBO	67
FIG.3.23 ADITAMENTO DE MONTAJE PARA FABRICAR TURBOS.....	68
FIG. 3.24 PREFORMA MONTADA EN ADITAMENTO PARA INICIAR MAQUINADO DE TURBO.	69
FIG. 3.25 PIEZA TERMINADA (ÁLABES DEL TURBO).....	70
FIG. 3.26 COMPARADOR ÓPTICO DELTRONIC MPC-5	71
FIG. 4.1 ANOVA PARA EL DISEÑO DE EXPERIMENTOS FACTORIAL	75
FIG. 4.2 GRÁFICA DE PROBABILIDAD NORMAL PARA RESPUESTA TIEMPO CICLO	76
FIG. 4.3 GRÁFICA DE EFECTOS PRINCIPALES PARA EL TIEMPO DE CICLO RPM VS MEDIA TIEMPO	77
FIG. 4.4 GRÁFICA DE EFECTOS PRINCIPALES PARA EL TIEMPO DE CICLO AVANCE VS MEDIA TIEMPO	78
FIG. 4.5 GRÁFICA DE INTERACCIÓN PARA TIEMPO DE CICLO PRIMERA FASE	78
FIG. 4.6 ANOVA PARA EL DISEÑO DE EXPERIMENTOS FACTORIAL SEGUNDA FASE	80



FIG. 4.7 GRÁFICA DE EFECTOS PARA EL TIEMPO DE CICLO AVANCE VS MEDIA TIEMPO SEGUNDA FASE	81
FIG. 4.8 GRÁFICA DE EFECTOS PARA EL TIEMPO DE CICLO RPM VS MEDIA TIEMPO SEGUNDA FASE	82
FIG. 4.9 GRÁFICA DE INTERACCIÓN PARA TIEMPO CICLO SEGUNDA FASE	82
FIG. 4.10 PANTALLA DE OPERACIÓN DE MÁQUINA CNC DE 5 EJES	83
FIG. 4.11 INSPECCIÓN DE ESPESORES DE PIEZAS UTILIZANDO COMPARADOR ÓPTICO	83
FIG. 4.12 PANTALLA DEL COMPARADOR ÓPTICO MOSTRANDO DIMENSION DEL ESPESOR	84
FIG. 4.13 INSPECCIÓN DE ALTURAS DE PIEZAS UTILIZANDO COMPARADOR ÓPTICO.....	85
FIG. 4.14 PANTALLA DEL COMPARADOR ÓPTICO MOSTRANDO DIMENSION DE ALTURA.....	85

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA	PÁGINA
TABLA 2.1. FLUIDOS MÁS COMUNES PARA CORTE.....	46
TABLA 4.1 RESULTADOS DEL DISEÑO DE EXPERIMENTOS FACTORIAL PARA TIEMPO DE CICLO PRIMERA FASE	74
TABLA 4.2 RESULTADOS DEL DISEÑO DE EXPERIMENTOS FACTORIAL PARA TIEMPO DE CICLO SEGUNDA FASE.....	79
TABLA 4.3 MEDICIONES DE. ESPESORES Y ALTURAS DE LOS ÁLABES A TRAVÉS DEL COMPARADOR ÓPTICO	87



Agradecimientos

A Dios,

Por darme la fuerza, voluntad y guiarme para cumplir este sueño.

A mi Madre María de Jesús Arreola Sáenz,

Gracias por haberme dado la vida, amor, comprensión, apoyo incondicional y hacer de mi lo que ahora soy. Todos mis triunfos siempre son dedicados y pensados para ti.

A mis hermanos Fausto, Sergio y Carlos,

Gracias por siempre estar ahí, por ser mis 3 pilares y ejemplos a seguir.

Agradecimiento especial a mi hermano Carlos por sus consejos y apoyo incondicional, por ser la persona que me motiva a seguir superándome, donde quiera que estés, Gracias Bro.

Al Dr. Álvaro González,

Gracias por su dedicación, paciencia y guía para llevar a buen término este trabajo de tesis.

A los maestros,

Dra. Margarita Gil Samaniego, Dr. Jesús Márquez, MC Rigoberto Zamora y muy especial al Dr. Víctor Nuño, gracias a todos por su dedicación y haber sido parte de este trabajo.



Resumen

La presente tesis tiene como objetivo la manufactura de superficies complejas utilizando la metodología del diseño de experimentos para la optimización de los procesos de maquinados. En este trabajo específicamente se realizó un análisis profundo de como manufacturar un turbo o álabe para turbocompresores o turbinas de gas, como parte de una superficie compleja.

En este trabajo se detalla cómo fabricar paso a paso turbos (álabes) para un turbocompresor automotriz, proporcionando los valores óptimos como punto de inicio en la fabricación, utilizando herramientas convencionales de bajo costo. La utilización del diseño de experimentos nos permitió verificar los factores significativos para nuestro proceso de maquinado en máquinas de control numérico de 5 ejes. Se trabajó en la reducción del tiempo de ciclo de maquinado, así como también, en la variabilidad dimensional cuyos resultados se inspeccionaron a través de un instrumento de medición industrial preciso. Para poder encontrar los factores que afectan la variable del tiempo se realizó un diseño de experimentos factorial y así poder optimizar el tiempo en la máquina de 5 ejes la cual trabaja a una tercera parte de su capacidad. Se compararon los tiempos reales de maquinado contra los tiempos proporcionados por el programa MasterCAM donde obteníamos menores tiempos de maquinado en la simulación.

Esta investigación proporciona alternativas para la fabricación al recomendar una ruta de maquinado óptima, método de dimensión para las piezas, herramientas de cortes adecuadas para fabricar superficies complejas, aditamentos de montaje para la disminución de la variación dimensional debido a las vibraciones ocasionadas durante el proceso de maquinado, así como también, la obtención de los factores que inciden en la reducción del tiempo de ciclo de maquinado.



Abstract

The present thesis deals with the manufacturing of complex surfaces using the design of experiments methodology to optimize the machining process. In this investigation a deep analysis was performed of how to manufacture a turbo or blade for turbochargers and gas turbines as a part of complex surfaces.

This workpaper details how to manufacture turbos (blades) step by step for an automotive turbocharger, providing the optimal values as a starting point in the manufacturing process, using low cost conventional tools. The use of the methodology of design of experiments allowed us to verify the significant factors for our machining process in numerical control machines of 5 axes. We worked in the reduction of the machining cycle time as well as in the dimensional variability, whose results were inspected through an accurate industrial measurement instrument. In order to find the factors that affect the response variable time, a factorial design of experiments was carried out to optimize the time in the 5-axis machine, which works at a third of its capacity. The real machining times were compared against the times provided by the MasterCAM program where we obtained lower machining times in the simulation.

This research provides alternatives for manufacturing by recommending an optimal machining path, dimension method for the parts, cutting tools suitable for manufacturing complex surfaces, mounting fixtures for reduction of dimensional variation due to the vibrations caused during the process machining, as well as obtaining the factors that affect the reduction of the machining cycle time.



Introducción

Hoy en día en la industria metalmecánica se fabrican un gran número de piezas con alta complejidad de maquinado, en varios sectores industriales como lo son aeroespacial, automotriz, petroquímicas y de moldeo por inyección, cada vez nos exige la mejora continua en estos procesos

La reducción de tiempos de maquinado y el uso de los parámetros adecuados (avance, revoluciones por minuto, escalones de corte, procedimiento de preforma, manejo de planos de trabajo y herramientas de corte, adicionando las condiciones de refrigerante y el tipo de materia prima) para el maquinado de las piezas nos permite desarrollar procedimientos optimizados y estándares en la fabricación de partes complejas. Específicamente para esta investigación, maquinados en álabes para turbinas de gas y turbocompresores.

Existen varias herramientas en la ingeniería industrial para la mejora continua que nos ayudan en nuestros procesos con la reducción de tiempos de máquina, reducción de costos y optimización de procesos. Para esta investigación usaremos la metodología de diseño de experimentos para optimizar la fabricación de álabes de turbocompresores en máquinas CNC de 5 ejes.

El diseño de experimentos aplicado a esta técnica obligará a la fabricación de varios modelos estandarizados con variación de variables críticas identificadas previamente con experimentos preestablecidos. En la industria, tradicionalmente la fabricación de este tipo de piezas se realizaba por fundición lo cual tenía consecuencias directas de vibraciones nocivas que tendrían que eliminarse por balanceo y con reducción de masa en puntos de control.



Hipótesis

A través del control de la variación de parámetros de maquinado para la fabricación de superficies complejas, se obtendrá el proceso de maquinado óptimo y reducción de la variación dimensional, específicamente para la fabricación de álabes de turbocompresores automotriz.

Alcance

La fabricación de turbocompresores actualmente requiere de procesos de maquinado muy precisos y de tiempos de ciclos mínimos, es por ello que se necesita encontrar los valores óptimos del proceso de manufactura principalmente relacionados con las velocidades de avance y las revoluciones de la herramienta, así como también, la técnica del proceso (profundidad de corte, la ruta de maquinado y control de movimiento de los ejes 4^{to}-5^{to}).

De acuerdo a estas condiciones se preparó un diseño experimental sobre un modelo de turbocompresor típico para la obtención de las condiciones óptimas que reduzcan la variabilidad dimensional.



Objetivo general

Optimización de los ciclos de maquinado para fabricación de turbos en máquinas de control numérico de 5 ejes a través de la metodología del diseño de experimentos en el control de parámetros de maquinado.

Objetivos específicos

- Utilizar herramientas convencionales para fabricar álabes para turbocompresores en máquina CNC 5 ejes
- Usar modelo típico de un turbo para el diseño experimental
- Diseñar y fabricar aditamentos de sujeción para el maquinado del turbo
- Generar la ruta de maquinado óptimo
- Análisis de variabilidad dimensional en el maquinado
- Análisis de reducción de tiempo de maquinado



Justificación

Actualmente el mercado de aplicación automotriz ha incrementado considerablemente la fabricación de álabes para turbinas y compresores. El estudio se enfocó a la fabricación de turbocompresores.

Se realizó este proyecto para obtener tablas de optimización en el maquinado de turbos en máquinas de control numérico de 5 ejes, que involucran factores como la velocidad de avance de corte, profundidad de corte, velocidad del husillo, tipo de cortador y material de la pieza, a través de la metodología de diseño de experimentos.

Con este estudio se aportó a la industria (aeroespacial y automotriz), así como también, a talleres de maquinado, facilitar el proceso de fabricación de los turbos para turbinas y compresores.



Capítulo 1. Antecedentes

1.1 Antecedentes de las turbinas de gas

La primera referencia del fenómeno al que se basa la turbina se tiene registrada en el año 150 A.C. a cargo del filósofo egipcio Herón de Alejandría (también conocido como Hero) quien ideó un pequeño juguete llamado “Aeolípilo” (ver figura 1.1), el cual giraba a partir del vapor generado en una pequeña caldera. El vapor se producía en unos de los soportes del eje de la esfera y salía por dos toberas tangenciales, cuya reacción originaba un empuje que la obligaba a girar [1].

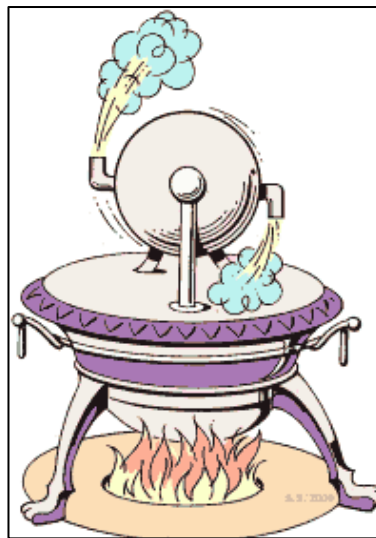


Fig. 1.1 Aeolípilo de Hero [1]

Aunque este dispositivo no pasó de ser un juguete con mucha inventiva, originó en su tiempo uno de los descubrimientos más rentables en la humanidad. En el año de 1629 el italiano Giovanni Branca ideó un dispositivo para la molienda que se basaba en una rueda de paletas accionadas por un chorro de vapor. El giro era transformado mecánicamente en movimientos alternativos, y se lo aprovechaba para moler los granos en varios morteros.



Análisis en la manufactura de superficies complejas a través del diseño de experimentos



La primera patente de una turbina de gas fue obtenida por el inglés John Barber en 1791, pero al no proveer posibilidades prácticas su máquina no prosperó más allá de un bosquejo. La utilización de esta turbina estaba limitada a maquinas donde no importara su peso (buques, locomotoras) [2]

A comienzos del siglo pasado con el desarrollo del motor de combustión interna el vuelo mecánico comenzó a desarrollarse a pasos agigantados, lográndose los mejores resultados con el propulsor de pistón de encendido eléctrico. Sin embargo, paralelamente al desarrollo de esta planta de poder, pocos ingenieros e inventores dedicaban horas y dinero al estudio de la propulsión a reacción con fondos privados, pues ningún estado manifestaba interés en este tipo de artefactos.

La primera turbina de gas realmente construida mostrada en la figura 1.2, fue concebida por J.F. Stolze en 1872 a partir de una patente de Fernihoughs, y construida realmente entre 1900 y 1904 [2]. Constaba de un compresor axial multietapa, un intercambiador de calor que precalentaba el aire antes de entrar en la cámara de combustión, utilizando los gases del escape de la turbina, y una turbina de expansión multietapa. Tuvo muy poco éxito debido al bajo rendimiento del compresor y de la turbina, provocado por las bajas relaciones de compresión y la baja temperatura alcanzada por los materiales disponibles en esa época.

Los primeros turbocompresores axiales de rendimiento aceptables aparecen hasta 1926. A. A. Griffith establece los principios básicos de su teoría del perfil aerodinámico para el diseño de compresores y turbinas, y es a partir de aquí cuando se emprende el desarrollo de los compresores axiales. La teoría del perfil aerodinámico expuesta por Griffith es un importante hito en el desarrollo de las turbinas de gas, y gracias a los conocimientos desarrollados por Griffith se consiguió desarrollar compresores y turbinas de alto rendimiento.

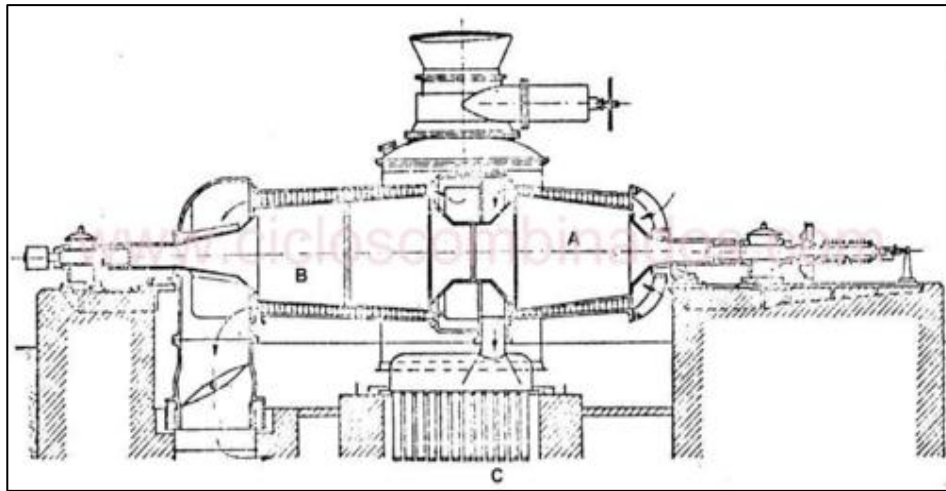


Fig. 1.2 Turbina diseñada por Stolz en 1872. (A) Compresor axial multietapa, (B) Turbina de reacción multietapa, (C) Precalentador de aire de admisión con los gases de escape [2]

A mediados de la primera guerra mundial un francés O. Morize y un británico H. Harris, propusieron en forma independiente el empleo de un compresor accionado mecánicamente en el que los gases de la combustión pasaban a través de una tobera para obtener la fuerza propulsora deseada. Cada uno por su lado, coincidieron en la utilización de un compresor para darle al aire una cierta presión y su posterior inyección en una o varias toberas, al mismo tiempo que se inflamaba el combustible atomizado.

Entre las originalidades del dispositivo de Harris cabe señalar que empleaba un compresor centrífugo y estaba diseñado para quemar una gran variedad de combustible. Además, contemplaba la posibilidad de orientar la salida de gases, con el fin de contribuir al control de la aeronave, idea que resulto revolucionaria para su tiempo.

El primer hito importante de la historia de los turborreactores, es la patente concedida en enero de 1930 al oficial Frank Whittle. En ella se proponía el desarrollo de un motor de reacción provisto con un compresor axial-centrífugo que



Análisis en la manufactura de superficies complejas a través del diseño de experimentos



era accionado por una turbina mediante los gases provenientes de varias cámaras de combustión. Este fue el primer motor de reacción concebido para reemplazar al pistón en la propulsión de aviones. El proyecto Whittle era avanzado por lo que el ministerio del aire y las empresas constructoras archivaron el diseño y no le prestaron atención. Pero la voluntad de Whittle y sus seguidores dio como resultado la creación de una compañía privada llamada Power Jet, que con un capital de 2000 libras esterlinas comenzó la fabricación del prototipo, que funcionó con un relativo éxito el 12 de abril de 1937 [3]

Si bien los alemanes no tenían el nivel teórico de los ingleses en este campo, no estuvieron sujetos a la miopía oficial que tuvo el proyecto de Whittle en los primeros años. Poco antes de 1935, un estudiante de física avanzada de la universidad de Geottingen, Hans von Ohain, se interesó en la propulsión de aeronaves con turbinas de gas y obtuvo diversas patentes de ingenios similares al motor Whittle. En aquellos años el constructor aeronáutico Ernst Heinkel también mostró interés en el diseño de un avión de alta velocidad, ya que conociendo las limitaciones del motor convencional y las hélices, este buscaba una nueva planta motriz para sus nuevos proyectos.

En 1936 Heinkel había apoyado con entusiasmo las ideas de Warner von Praun en el sentido de que en un futuro cercano un cohete de propelente líquido constituiría la planta motriz de todo avión que intentase superar los 700 km/hr, lo que se quiso demostrar con el He-176. Sin embargo, el escepticismo de ministerio del aire alemán y los sucesivos accidentes hicieron pensar a Heinkel que era momento de buscar un proyecto menos mortífero para sus pilotos de prueba. El dispositivo lo realizó el mismo von Ohain a un costo de 50,000 marcos y obtuvo resultados discretos, pues el empuje logrado fue de solo 249kg usando hidrógeno como combustible.



Este uso masivo del motor de reacción unido a los nuevos conocimientos de aerodinámica permitió el desarrollo de turbomáquinas con alto rendimiento. De esta forma, a partir de los años 60 el uso del reactor se generalizó y en la década de los 70 prácticamente toda la aviación de gran potencia era impulsada por turbinas. El desarrollo de la turbina de gas ha tenido históricamente, tres obstáculos que han dificultado su desarrollo:

- La relación de compresión del compresor y su rendimiento.
- La resistencia de los materiales para poder usar altas temperaturas en la cámara de combustión y en las primeras etapas de la turbina.
- La dificultad para controlar todo el sistema de forma manual.

El desarrollo de la turbina de gas sólo ha sido posible tras desarrollar un compresor axial a partir de la mejora de conceptos aerodinámicos, que han permitido altas relaciones de compresión. El segundo de los pilares ha sido la innovación tecnológica en el campo de los materiales, con el desarrollo de nuevas aleaciones mono-cristal y recubrimientos cerámicos. Esto, unido un profundo estudio de la refrigeración interior del alabe ha permitido alcanzar temperaturas muy altas tanto en cámara de combustión como en las primeras ruedas de álabes. La tercera de las claves ha sido el desarrollo de la informática. El empleo de ordenadores ha permitido por un lado poder simular determinadas condiciones y comportamientos, para así mejorar los diseños [2]



1.2 Funcionamiento de una turbina de gas

1.2.1 Ciclo termodinámico

Una turbina de gas como se describe en [4,5,6] es un motor térmico rotativo de combustión interna, donde a partir de la energía aportada por un combustible se produce energía mecánica y se genera una importante cantidad de calor en forma de gases calientes y con un alto porcentaje de oxígeno. El ciclo térmico que representa esta máquina es el ciclo Brayton.

Este ciclo fue propuesto por primera vez por George Brayton para emplearlo en el motor reciprocante que quemaba aceite que construyó en 1870. Hoy en día se utiliza en turbinas de gas donde los procesos tanto de compresión como expansión sucede la maquinaria rotatoria. En su forma más simple las turbinas de gas operan en un ciclo abierto cómo se ilustra en la figura 1.3

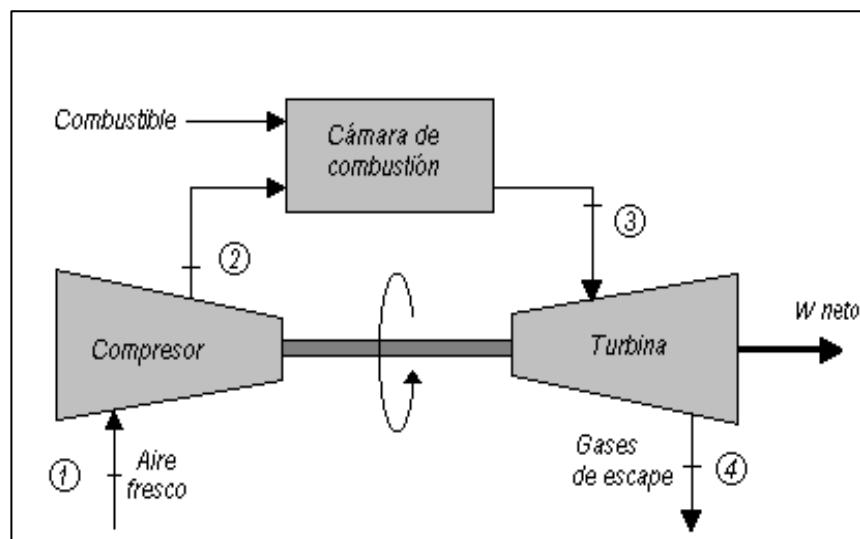


Fig. 1.3 Turbina de gas en ciclo abierto (Ciclo Brayton simple) [4]

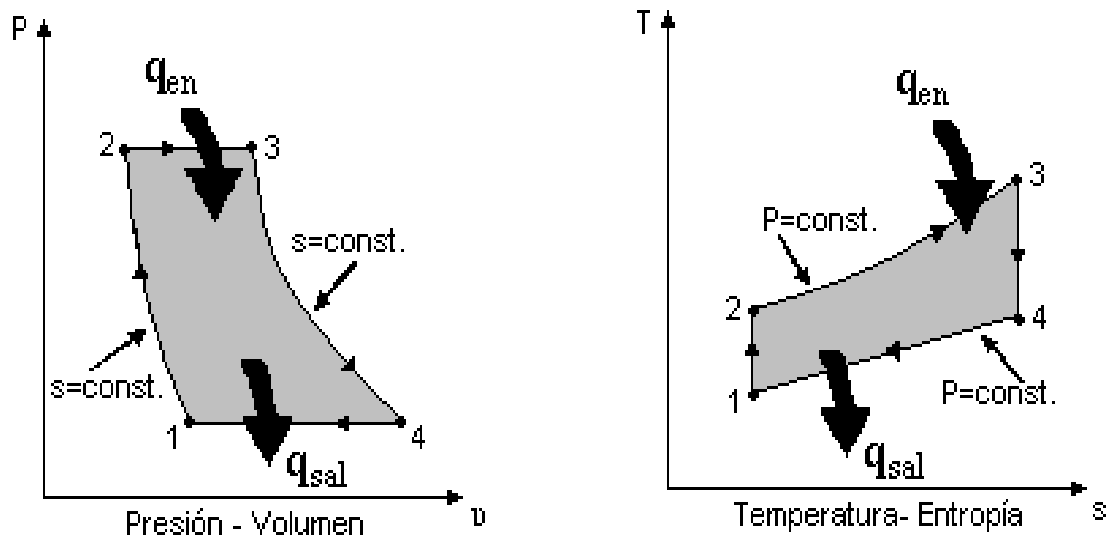


Fig. 1.4 Diagramas T-S y P-V del ciclo Brayton [4]

En la figura 1.4 se describe el ciclo Brayton ideal donde aire fresco en condiciones ambiente se introducen al compresor donde su temperatura y presión se eleva punto (punto 1-2). El aire de alta presión sigue hacia la cámara de combustión de combustibles se quema a presión constante (punto 2-3). Luego de los gases de alta temperatura que resultan entran a la turbina donde se expanden hasta la presión atmosférica de tal forma que produce potencia (puntos 3-4). Los gases de escape que salen de la turbina se expulsan al ambiente (punto 4-1).

El ciclo de turbina de gas abierto recién descrito y mediante las suposiciones de aire estándar puede moldearse como ciclo cerrado como se ilustra en la figura 1.5. En este caso los procesos de compresión y expansión permanecen iguales, pero el proceso de combustión se sustituye por un proceso de adición de calor a presión constante de una fuente externa, y el proceso de escape se reemplaza por uno de rechazo de calor a presión constante hacia el aire ambiente. El ciclo ideal que el fluido de trabajo experimenta es el ciclo Brayton, que está integrado por cuatro etapas internamente reversibles:



1-2 Compresión isentrópica (en un compresor)

2-3 Adición de calor a presión constante

3-4 Expansión isentrópica (en una turbina)

4-1 Rechazo de calor a presión constante

La operación básica de la turbina de gas es similar a la máquina de vapor, excepto que en lugar de agua se usa el aire. El aire fresco de la atmósfera fluye a través de un compresor que lo eleva a una alta presión. Luego se añade energía dispersando combustible en el mismo y quemándolo de modo que la combustión genera un flujo de alta temperatura. Este gas de alta temperatura y presión entra a una turbina, donde se expande disminuyendo la presión de salida, produciendo el movimiento del eje durante el proceso. El trabajo de este eje de la turbina es

mover el compresor y otros dispositivos como generadores eléctricos que pueden estar acoplados. La energía que no se usa para el trabajo sale en forma de gases, por lo cual tendrán o una alta temperatura o una alta velocidad [4].

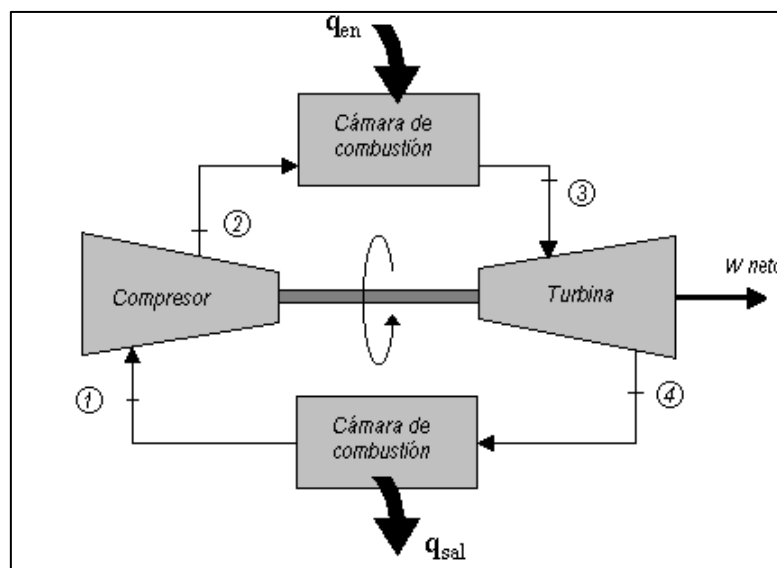


Fig. 1.5 Motor de turbina de gas de ciclo cerrado [4]



1.2.2 Tipo de motores de turbina de gas

Dentro del mundo de las turbinas de gas se puede distinguir varios tipos de motores [1,7], que son usados para diferentes aplicaciones. Algunos de estos tipos se describen a continuación:

1.2.2.1 Motor turbo propulsor.

El motor turbo propulsor (figura 1.6), es el tipo más antiguo de motor de turbo propulsión. De diseño simple, pero altamente modificado gracias al desarrollo tecnológico, este motor consta de una entrada de aire, un compresor de aire, una cámara de combustión, una turbina y una tobera. El aire se comprime hacia la cámara de combustión, es calentado al quemarse el combustible y luego se expande a través de la turbina hacia la tobera donde se acelera a grandes velocidades para generar propulsión.

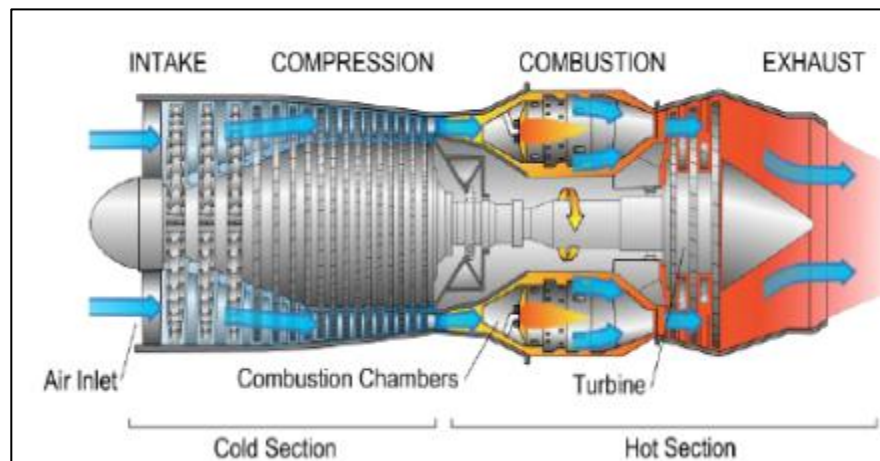


Fig. 1.6 Motor Turbo propulsor [1]

1.2.2.2 Motor turbo hélice

Un motor turbohélice (figura 1.7), es un tipo de motor para aeronaves que usa una turbina de gas para accionar una hélice. La turbina de gas es diseñada



específicamente para esta aplicación para que casi toda la salida de potencia sea usada para el accionamiento de la hélice. Los gases de escape del motor contienen una pequeña cantidad de energía a diferencia de un motor turbo propulsor y tienen un rol mínimo en la propulsión de la aeronave.

Su funcionamiento y partes son prácticamente iguales a un motor turbo propulsor y difiere básicamente en dos partes: una turbina adicional para accionar la hélice y una caja de transmisión de reducción para convertir las altas rpm y bajo torque de salida a bajas rpm y alto torque. La expansión de los gases ocurre en la tobera de propulsión donde éstos se expanden a la presión atmosférica, pero en el caso de un motor turbo hélice la tobera provee una porción pequeña del empuje generado. Mientras un motor turbo propulsor está diseñado para acelerar un flujo de masa de aire relativamente pequeño a una velocidad de escape alta, un motor turbo hélice está diseñado para acelerar un gran flujo de masa de aire a una velocidad baja. Esto resulta en una alta eficiencia del combustible a expensas de velocidad de vuelo y mayor generación de ruido.

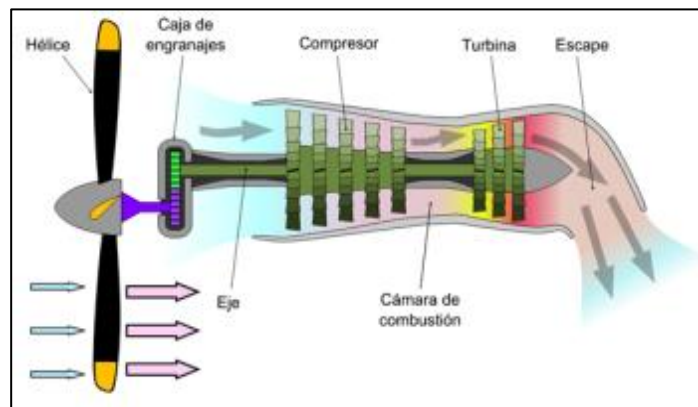


Fig. 1.7 Motor Turbo hélice [8]

1.2.2.3 Motor turbo ventilador

El motor turbo ventilador (figura 1.8), es el tipo más común de motor de turbina de gas usado para propulsión de aeronaves. Similar a un motor turbo hélice la



sección de la turbina está diseñada para absorber más energía de los gases de escape de la que sería necesaria para accionar el compresor solamente. Este exceso de energía es usado para accionar un ventilador y un compresor de baja presión de un diámetro mayor al del compresor principal. Parte del flujo de aire frío que entra al motor, después de haber pasado por la sección del ventilador, pasa por la parte externa y alrededor del núcleo del motor y se expande en una tobera separada para brindar propulsión. En algunos tipos de motor se mezclan este flujo frío de aire con los gases calientes de escape para incrementar la eficiencia de propulsión.

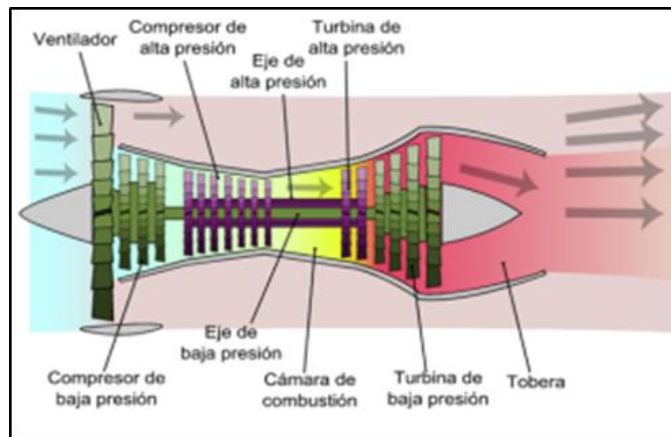


Fig. 1.8 Motor Turbo ventilador [8]

1.2.3 Componentes principales de una turbina de gas

1.2.3.1 Compresor.

El compresor es uno de los componentes más importantes que se tiene en las turbinas de gas. Su tarea es incrementar la presión del flujo de aire que entra por la entrada del motor. Este proceso se logra otorgándole parte de la potencia producida por las turbinas al compresor, en el que los álabes rotatorios ejercen fuerzas aerodinámicas en el fluido y lo comprimen. En la salida del compresor el flujo de aire altamente comprimido es descargado en la cámara de combustión.



Básicamente hay dos tipos de compresores que se usan en las turbinas de gas y son: compresor de flujo centrífugo y compresor de flujo axial [7,9,10].

El compresor centrífugo (figura 1.9) es una unidad de una o dos etapas que emplea el impulsor para acelerar el aire y un difusor para producir la elevación de presión requerida, además el flujo del aire comprimido se descarga radialmente al exterior a 90 grados del eje de las aspas. Actualmente los compresores centrífugos por su construcción y tamaño son usados en pequeños motores como los de los helicópteros, unidades auxiliares de poder, motores turbohélice.

El compresor axial (figura 1.10) es una unidad con múltiples etapas con filas de álabes rotatorios para acelerar el aire y aspas estacionarias para lograr el incremento en presión requerido y la dirección del flujo es paralela al eje de las aspas. Actualmente el compresor axial es usado en la mayor parte de los motores de turbinas de gas debido principalmente a su capacidad de entregar grandes flujos de masa de aire junto con tasas de compresión altas. Sin embargo, su estructura más compleja contribuye a elevar el costo y peso de motor.

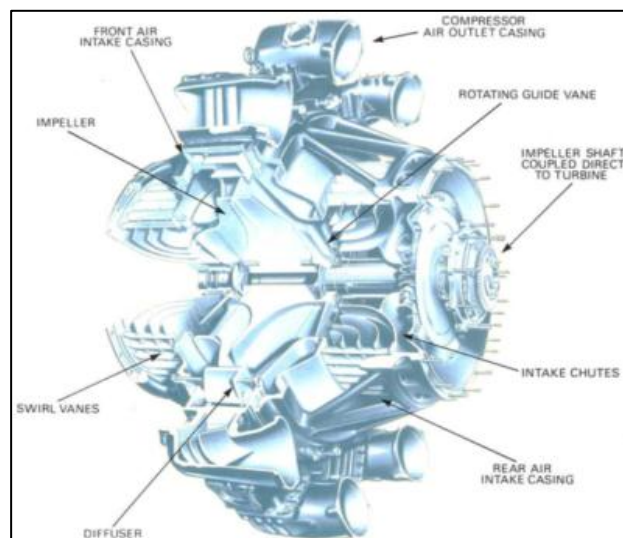


Fig. 1.9 Compresor centrífugo [1]

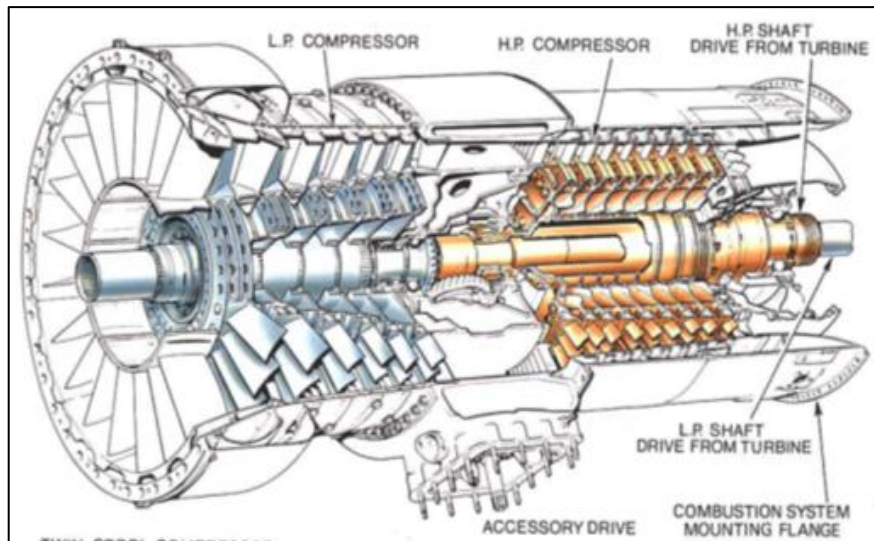


Fig. 1.10 Compresor axial [1]

1.2.3.2 Turbina.

La turbina tiene la tarea de proveer la potencia para accionar el compresor y demás accesorios, y en el caso de motores que no generan empuje la turbina debe de proveer potencia a la flecha para una hélice o un rotor. Esto lo logra extrayendo energía de los gases calientes liberados por el sistema de combustión y expandiéndolos a una presión y temperaturas más bajas. Este componente del motor es el que se está sometido al mayor estrés, ya que para una operación eficiente, es necesario que los álabes de la turbina giren con velocidades de rotación muy elevadas. El flujo continuo de gas al que las turbinas están expuestas puede llegar a tener una temperatura de entrada entre 850 y 1700 °C y pueden alcanzar velocidades de más de 2700 Km./h en algunas partes de la turbina. Para producir el torque, la turbina puede consistir en varias etapas cada una empleando una fila de aspas estacionarias y una de álabes en movimiento. El número de etapas dependerá de la relación entre la potencia requerida de flujo de gas, la velocidad de rotación a la que debe ser producida esta potencia y el diámetro permitido para la turbina.



La turbina debe de ser capaz de producir la potencia necesaria para que se pueda comprimir el aire y para eso la turbina debe producir alrededor de 75,000 kW o más dependiendo del tamaño del motor. Un solo álabe de la turbina extrae cerca de 200 kW de potencia al flujo del gas en movimiento. Las turbinas se clasifican en 2 diferentes tipos:

- Turbina de flujo radial
- Turbina de flujo axial.

Las turbinas de flujo radial son básicamente compresor centrífugo con flujo y rotación invertidos. Estas turbinas tienen la ventaja de tener una construcción más simple y que su fabricación es considerablemente más sencilla y menos costosa comparada con una turbina de flujo axial. Este tipo de turbinas son utilizadas para motores pequeños con cargas menores y son adecuados para un rango de operación menor al de una turbina axial. Las turbinas de flujo axial (figura 1.11) son usadas en el 80% de las aplicaciones de los motores de turbina de gas, debido a que tienen un área frontal pequeña lo que las hace ideales para su aplicación en industria aeronáutica. Sin embargo, su construcción es más larga, pesada y costosa que la turbina de flujo radial.

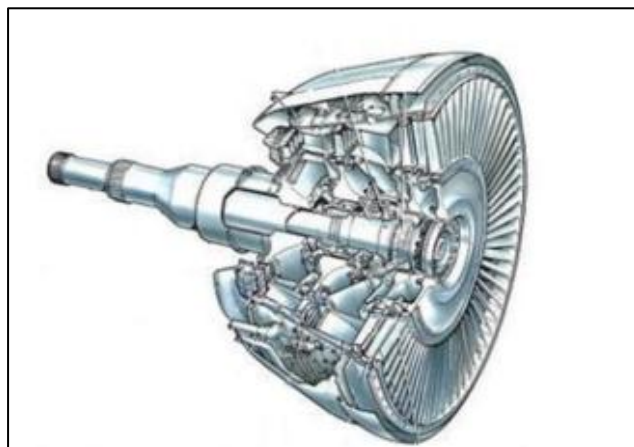


Fig. 1.11 Turbina flujo axial [1]



1.2.3.3 Cámara de combustión

La cámara de combustión tiene la difícil tarea de quemar grandes cantidades de combustible con grandes volúmenes de aire suministrados por los inyectores y por el compresor respectivamente, y liberando el calor de tal manera que el aire se expande y se acelera para dar un flujo uniforme de gas caliente con las condiciones requeridas por la turbina. Esta actividad debe ser realizada con pérdidas mínimas en presión y con la liberación máxima de calor para el espacio limitado disponible [11,12]

La cantidad de combustible añadido al aire dependerá del incremento de temperatura requerida. Sin embargo, la máxima temperatura que está dentro de los 850 y 1700°C, está limitada por los materiales con los que están fabricados los álabes y difusores. El aire ya ha sido calentado a una temperatura entre 200 y 500 °C, lo cual requiere aun un incremento de temperatura entre 650 y 1150 °C en el proceso de combustión, ya que la temperatura de los gases requerida para la turbina varía dependiendo el empuje del motor y en el caso de un motor turbo hélice dependiendo de la potencia requerida, la cámara de combustión tiene que ser capaz de mantener una combustión estable y eficiente para un amplio rango de condiciones de operación del motor. Las cámaras de combustión pueden ser de tres tipos como se menciona en [11,12] que son: anulares, tubulares y mixtas (figura 1.12).

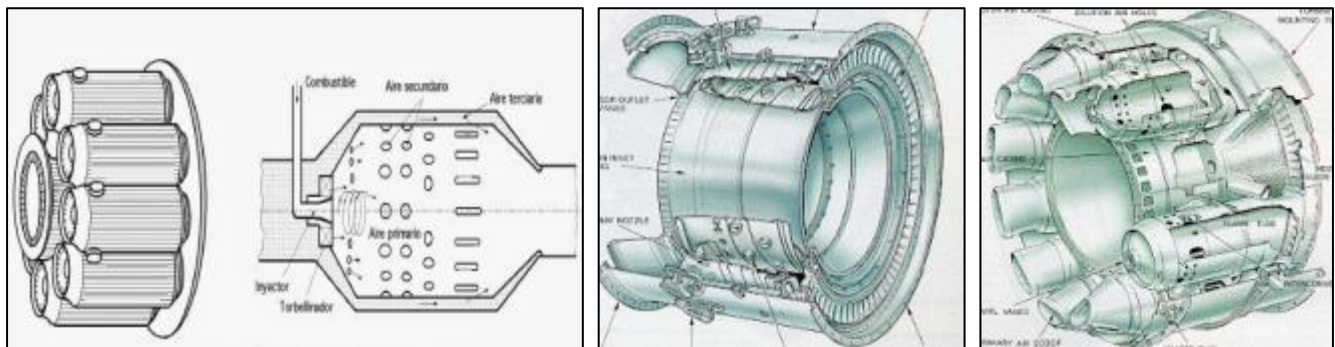


Fig. 1.12 Tipos de cámara de combustión: a) tubular, b) Anular, c) Mixta [12]



1.3 Sobrealimentación en los motores (Turbocompresor).

1.3.1 Antecedentes de la sobrealimentación.

La sobrealimentación de motores es muy antigua; existen patentes que son anteriores al siglo XX. Gran parte de la energía que se produce en el interior de los motores procedente de la combustión del combustible se pierde por el tubo de escape en forma de gases caliente [13].

El gran avance lo daría el ingeniero suizo Alfred Buchí como se menciona en [14], al ser el primero en tener la idea de aprovechar la energía de los gases de escape del motor para mover un compresor. Este pensamiento llevó al ingeniero Buchí a patentar el primer compresor el 16 de noviembre de 1905.

El invento de Buchí ingresaba más aire al interior de los cilindros del motor y aumentaba su llenado, lo que, asociado a una mayor alimentación de combustible, producía un aumento notable de la potencia. Entre 1911 y 1914, el técnico suizo trabajó febrilmente con el compresor aplicado a mecánicas diésel, y en 1915 ya había avanzado lo suficiente como para registrar una patente que describe los principios de funcionamiento del turbocompresor y que son casi exactamente los mismos que conocemos en la actualidad [15]

1.3.2 Sobrealimentación en motores de gasolina.

Cuando se desea incrementar la potencia de un motor, se hace necesario aumentar el volumen de mezcla aspirado por los cilindros en cada ciclo, lo cual implica la introducción en ellos de mayor cantidad de aire, a la que se sumará la gasolina necesaria para que la mezcla resulte idónea. Por cuanto se refiere al volumen de combustible, los sistemas de inyección, tanto Diesel como de gasolina, son capaces de proporcionar el necesario, mientras que la mayor cantidad de aire debe ser suministrado favoreciendo el efecto de aspiración



creado en el descenso del pistón en la carrera de admisión. Ello puede lograrse actuando sobre la forma y dimensiones de los conductos de admisión, diámetro y alzada de las válvulas, número de éstas, tomas dinámicas de aire, etc. Pero la solución más eficaz consiste en sobrealimentar el motor por medio de un compresor. De esta manera, la sobrealimentación es empleada para introducir en el cilindro un peso de fluido activo superior al correspondiente a la aspiración normal. Con ello se obtiene mayor potencia a igualdad de cilindrada [13]

Con el objeto de no alcanzar presiones máximas del ciclo demasiado elevadas, en los motores sobrealimentados se reduce ligeramente la relación de compresión, con respecto al valor correspondiente al motor atmosférico (no sobrealimentado). Con esto disminuye ligeramente el rendimiento térmico, pero ello es necesario (sobre todo en los motores de gasolina), para evitar el peligro de detonación que conlleva el aumento de presión al final de la fase de compresión, que tiene lugar al mejorar llenado del cilindro. Este riesgo no existe en los motores Diesel, en los que al contrario de lo que ocurre en los de gasolina, el aumento de presión implica una disminución del retardo a la inflamación, que da como resultado un funcionamiento menos rudo del motor.

El término compresor se utiliza para referirse a la bomba que suministra al motor el aire bajo presión, cuyo propósito fundamental es barrer el gas quemado y asegurar un completo llenado de aire fresco en cualquiera de las condiciones de funcionamiento del motor. Así pues, con la sobrealimentación se consigue aumentar el área útil del ciclo térmico del motor, a consecuencia del incremento de la densidad del aire y el aumento de la presión de alimentación

Con el aumento de la presión de la sobrealimentación se consigue evacuar mejor los gases quemados, realizando un mejor barrido del cilindro con los frescos, con lo cual, aumenta el rendimiento volumétrico. La consecuencia final es



un aumento sensible de la potencia del motor, que en los casos de sobrealimentación muy acusada puede llegar a ser muy importante, además si entre el compresor y el cilindro se interpone un enfriador de aire para aumentar aún más su densidad antes de entrar al motor, las ventajas son aún mayores.

Como se muestra en la figura 1.13 donde nos muestra las curvas de potencias de motores atmosféricos vs sobrealimentados en la actualidad, como podemos observar tienen la misma presión máxima pero la diferencia es que las dan a diferentes revoluciones, los motores sobrealimentados nos da la potencia máxima a menores revoluciones y un par de motor más elevado, lo que nos lleva a una reducción de combustible considerada [16]

Este tipo de motores son muy comunes en la actualidad y están abarcando el mercado a nivel mundial, lo cual hace que la demanda de fabricación de turbos aumente considerablemente, debido a la introducción de motores más pequeños con menor cilindrada sobrealimentados, cuyos beneficios son el menor consumo de combustible y menor contaminación que los motores de aspiración natural.

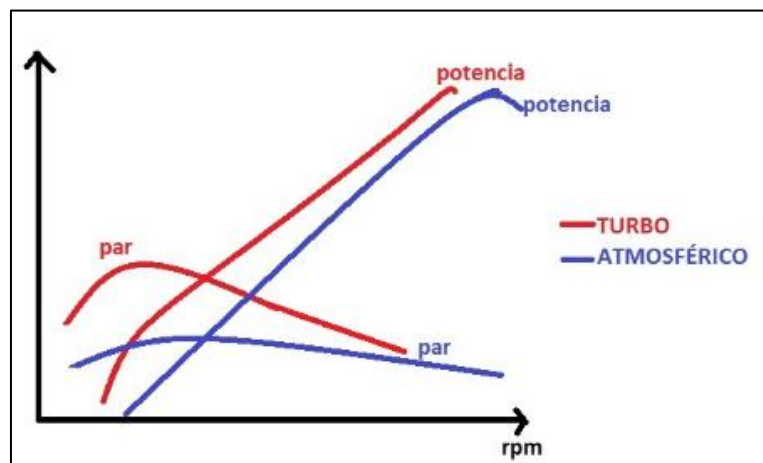


Fig. 1.13 Curvas de motor aspiración natural (atmosférico) Vs sobrealimentado (turbo) [16]



Este tipo de motores son muy comunes en la actualidad y están abarcando el mercado a nivel mundial, lo cual hace que la demanda de fabricación de turbos aumente considerablemente, debido a la introducción de motores más pequeños o downsizing con menor cilindrada sobrealimentados, cuyos beneficios son el menor consumo de combustible y menor contaminación que los motores de aspiración natural.

1.3.3 Turbocompresor.

Es una turbo máquina térmica diseñada para aprovechar la energía de los gases de escape de un motor, cuya misión fundamental es presionar el aire de admisión, para de este modo incrementar la cantidad de masa de aire que entra en los cilindros del motor en la carrera de admisión, permitiendo que se queme eficazmente más cantidad de combustible. De este modo, el par motor y la potencia final pueden incrementarse hasta un 40% gracias a la acción del turbo.

Este dispositivo ha sido proyectado para aumentar la eficiencia total del motor [13]. La energía para el accionamiento del turbocompresor se extrae de la energía desperdiciada en el gas de escape del motor. Un turbocompresor puede girar a velocidades de hasta 250,000 RPM. Se compone por un compresor centrífugo que comprimen los gases de admisión, una turbina que es accionada por los gases de escape y un eje en común (rotor) que los hace girar en solidario (figura 1.14)

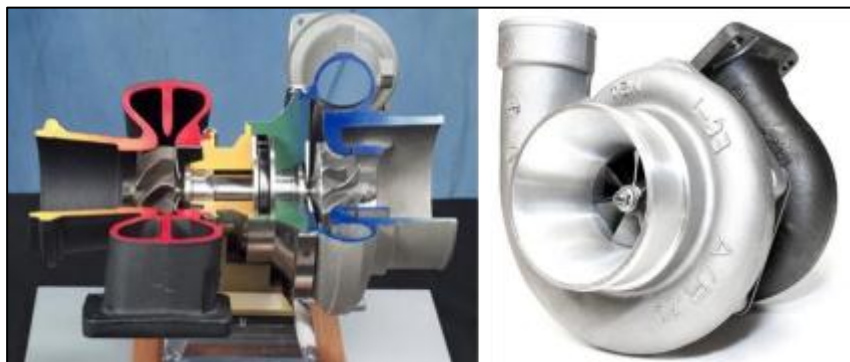


Fig. 1.14 El Turbocompresor [13]



1.3.4 Funcionamiento del turbo

Una vez puesto en marcha el motor como se muestra en la figura 1.15, los gases de escape de motor que pasan a través del alojamiento de turbina hacen que giren la rueda de turbina y el eje, los gases se descargan a la atmósfera después de pasar por el alojamiento de turbina, el turbocompresor responde a las exigencias de carga del motor reaccionando al flujo de los gases de escape del motor. Al ir aumentando el rendimiento del motor aumenta el flujo de los gases de escape y la velocidad y el rendimiento del conjunto rotatorio aumentan proporcionalmente mandando más aire al soplador del motor. Es el dispositivo más eficaz para sobrealimentar los motores empleados en los automóviles, pues el balance económico de funcionamiento logrado con ellos resulta netamente favorable, ya que la potencia sustraída al motor para lograr su funcionamiento, es solamente la correspondiente al ligero aumento de la contrapresión de escape, no consume potencia del motor y puede girar a más de 120,000 rpm. Se clasifican en 2 tipos:

- Turbocompresores de geometría fija.
- Turbocompresores de geometría variable.

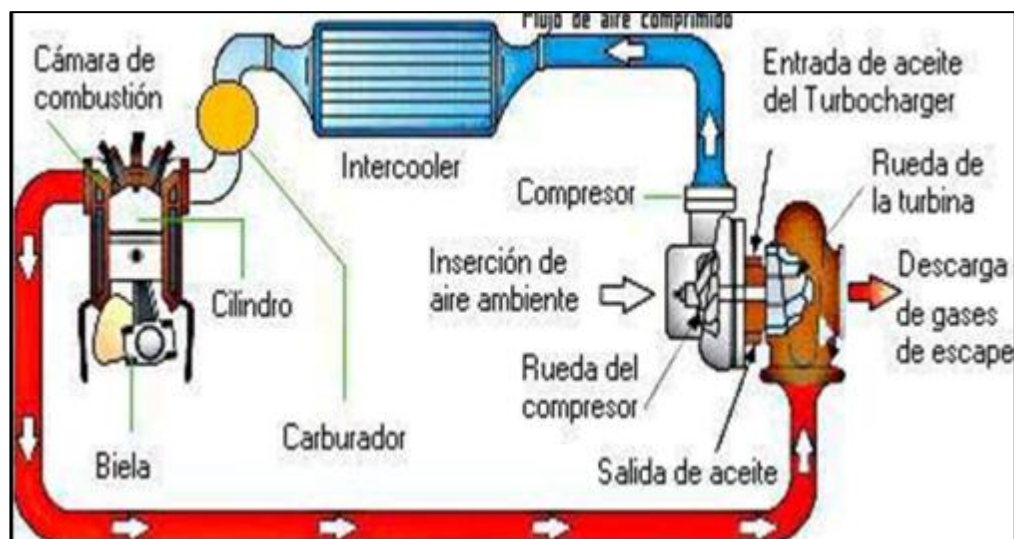


Fig. 1.15 Funcionamiento de un turbocompresor [17]



1.3.5 Turbocompresor de geometría fija

El turbocompresor [17] está formado principalmente por una turbina (2) y un compresor (1) que se encuentran introducidos en sus respectivas carcassas de forma opuesta y unida ambas por un eje común (3) como se muestra en la figura 1.16. Tanto la turbina como el compresor contienen álabes para conseguir aumentar la presión de alimentación. En una parte anexa al turbo se encuentra la válvula de descarga (4) Wastegate, que se encarga de limitar la presión de sobrealimentación del turbo desviando una cantidad de gases de escape directamente al escape sin pasar por la turbina (figura 1.16).

La carcasa de la turbina tiene forma de caracol para aumentar la velocidad de los gases haciéndolos incidir con mayor fuerza sobre sus álabes. La carcasa del compresor tiene el mismo aspecto que la turbina, pero sus condiciones de utilización son menos extremas en cuanto a temperaturas, pero son iguales en cuanto a la presión que se produce en ellas.

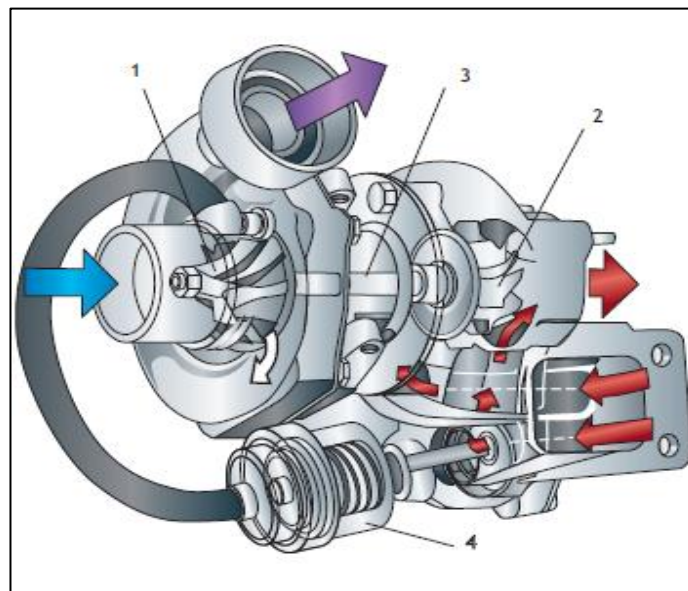


Fig. 1.16 Estructura de un turbocompresor [17]



En la parte central se ubica el eje que une la turbina y el compresor. Este eje está sometido a altas sollicitaciones mecánicas debido al giro y, además, debe soportar elevadísimas temperaturas (alrededor de los 900°C). El eje se apoya en el turbocompresor por medio de cojinetes o rodamientos (turbos muy pesados) en sus extremos y está en contacto con el circuito de engrase (figura 1.17) para conseguir un perfecto movimiento del eje y una refrigeración debido a las altas temperaturas. La falta de una lubricación correcta puede provocar la destrucción del turbo en cuestión de minutos.

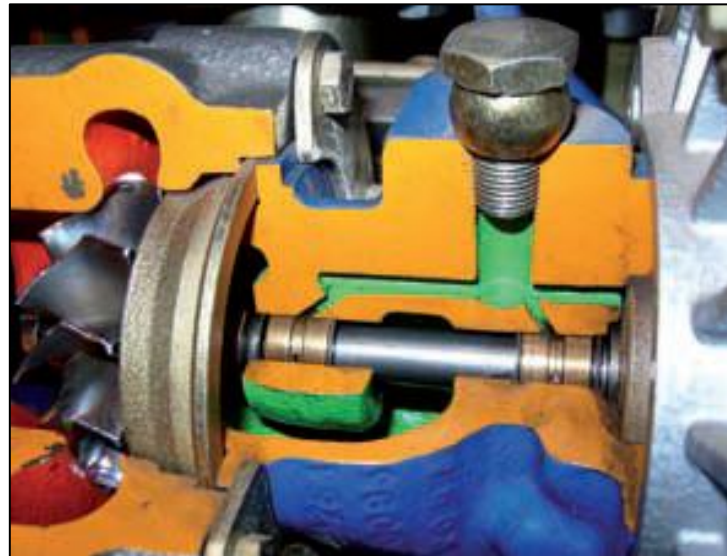


Fig. 1.17 Circuito de engrase de un turbocompresor (zona verde) [17]

1.3.6 Sistema de regulación de la presión del turbo

La regulación de la presión de sobrealimentación permite suministrar al motor una presión límite variable de sobrealimentación, la cual está acorde con las condiciones de trabajo, tanto de solicitud de carga como a las climatológicas, temperatura del aire y presión atmosférica. Para ello, el turbocompresor dispone de una válvula mecánica wastegate encargada de regular la presión de soplado del mismo.



Esta válvula está situada en derivación (by-pass) con el conducto de escape (figura 1.18). Está constituida por una cápsula sometida a la presión de sobrealimentación, una membrana y una cámara de presión con un muelle tarado. El accionamiento de esta válvula puede ser de tipo neumático o eléctrico.



Fig. 1.18 Válvula Wastegate en el turbocompresor [17]

1.3.7 Temperaturas de un turbo

Las diferencias de temperaturas que se alcanzan a un lado y otro del turbo son muy notables (ver figura 1.19). En la turbina se pueden alcanzar temperaturas de 800 a 1000 °C, mientras que en el compresor como máximo se alcanzan unos 80 °C. Esto hace que el eje común al que se unen tanto la turbina como el compresor esté sometido a temperaturas muy diferentes en sus extremos, lo cual dificulta el diseño y sobre todo la elección de materiales para su construcción.

El turbo se refrigera principalmente por el aceite de engrase, y además por el aire de entrada del colector de admisión que recoge parte del calor que contiene el rodete compresor. Hay que destacar que esto último no es nada beneficioso para el motor, ya que el aire caliente hace dilatar el aire de admisión y descender su



densidad, con lo que el rendimiento volumétrico del motor se ve seriamente perjudicado.

1.3.8 Intercambiador de calor (Intercooler).

Es un sistema compuesto por un intercambiador de calor (figura 1.20) en el que se introduce el aire calentado que sale del rodete compresor para enfriarlo antes de introducirlo en los cilindros del motor. El aire que incide sobre este intercambiador o radiador proviene del exterior durante la marcha del vehículo y consigue rebajar la temperatura del aire que pasa por el interior del intercooler unos 40 °C (el aire de admisión en motores turboalimentados puede alcanzar hasta 100 °C). Por lo tanto, se trata de un intercambiador de calor aire/aire. Con él se consigue aumentar la potencia y el par del motor debido al aumento de la masa de aire que entra en el cilindro como consecuencia de la subida de densidad del aire cuando este enfría.

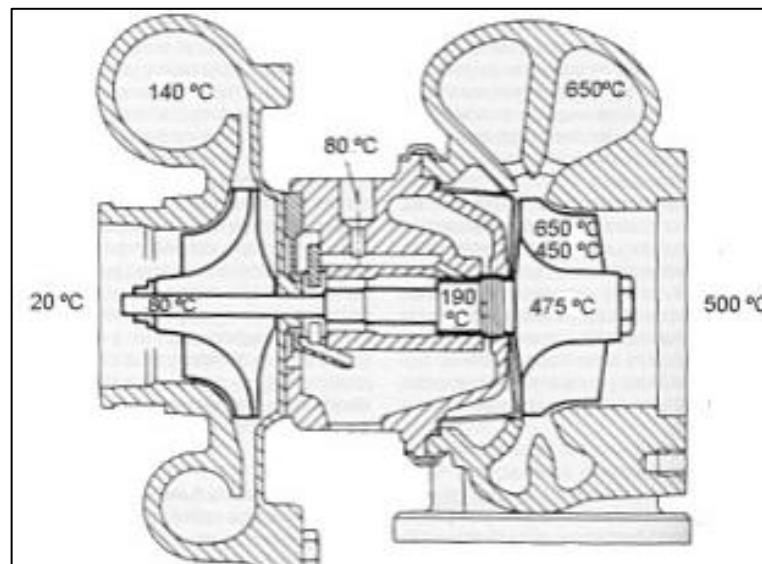


Fig. 1.19 Temperaturas que sufre un turbocompresor [17]

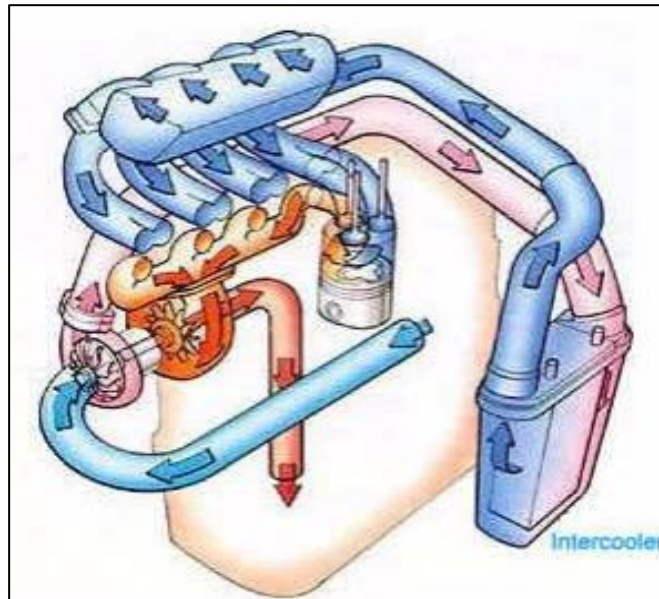


Fig. 1.20 Intercambiador de calor en el turbo (Intercooler) [17]

1.3.9 Turbocompresor de geometría variable

Los turbocompresores de geometría variable [17] tienen la característica de que a bajas revoluciones del motor se nota su efecto, eliminando el gran inconveniente de los turbocompresores de geometría fija. Son los más implantados en vehículos modernos. Su funcionamiento es similar a los de geometría fija, pero estos no necesitan de una válvula de descarga, puesto que el sistema puede hacer disminuir el giro de la turbina y, por tanto, rebajar la presión a los valores preestablecidos en determinados modos de funcionamiento del motor.

La gestión electrónica en este caso es la encargada de hacer disminuir o aumentar la fuerza que ejercen los gases de escape sobre la turbina. Con esto se consiguen tiempos de respuesta del turbo muy breves, además de velocidad de gases alta y un funcionamiento progresivo de la turbina desde bajos regímenes.



Para conseguir los efectos anteriormente expuestos se ha dispuesto en la turbina de escape del turbocompresor (figura 1.21) una corona o plato (3) con un número de álabes móviles (2) en su periferia. La corona, a su vez, se encuentra unida a una varilla (6) y está a una cápsula neumática (8) dividida en dos cámaras. Teniendo en cuenta que la presión que ejercen los gases de escape está relacionada con el número de revoluciones del motor, se podrán obtener diferentes regímenes de funcionamiento de la turbina según la orientación que tomen las paletas o álabes móviles, es decir, se variará la sección de paso de los gases de escape.

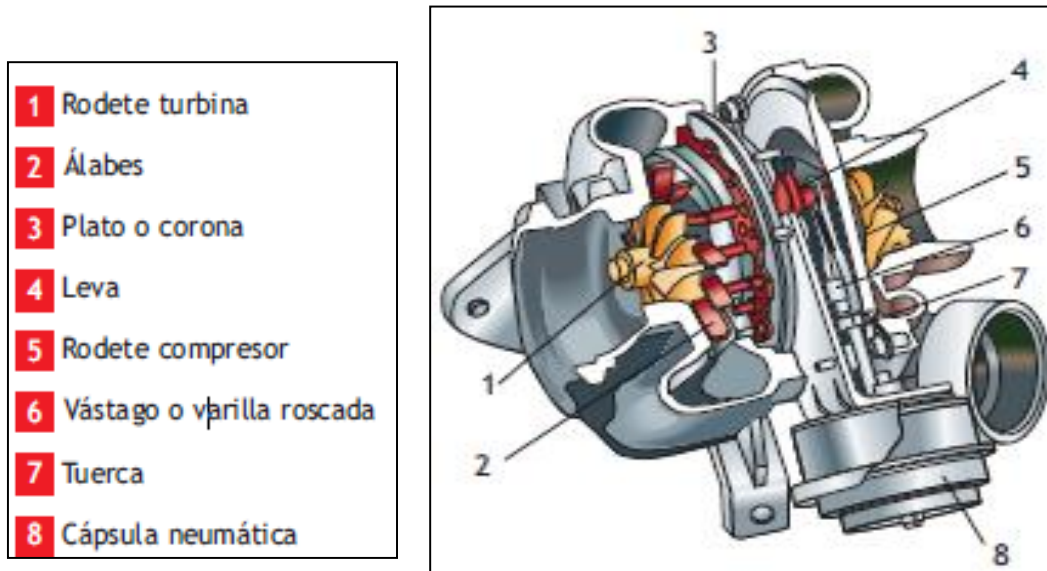


Fig.1.21 Estructura de un turbocompresor de geometría variable [17]



Capítulo 2. Marco Teórico

2.1 Introducción al maquinado de alta velocidad

Iniciado el siglo XXI es prácticamente inimaginable la revolución experimentada por la tecnología de fabricación en los últimos 10 ó 15 años. La evolución de los ordenadores, de las nuevas tecnologías de comunicación, etc., están revolucionando el mundo en general y, en particular el mundo empresarial.

El maquinado a alta velocidad hoy en día es una tecnología de corte con bases sólidas que abre las puertas del trabajo de materiales y figuras que antes no se podían maquinar mediante el trabajo convencional, como por ejemplo: materiales con una dureza superior a 50 HRC o paredes delgadas de 0.2 mm, etc.

Las condiciones del proceso (velocidad de corte, avance, profundidades de corte radial y axial) dependerán del material a maquinar, así como de las máquinas y herramientas disponibles. Cada material y aleación que se pretenda maquinar posee sus propias características de maquinabilidad, lo que marcará los límites operativos del proceso. Por ejemplo, no es lo mismo maquinar materiales blandos (aluminio, cobre, magnesio) que duros (aceros templados, titanio, níquel), materiales de gran maquinabilidad (aluminio, magnesio) que de poca maquinabilidad (titanio, acero para herramientas).

El maquinado de alta velocidad consiste en la optimización del maquinado con las posibilidades existentes limitado por la pieza/material a maquinar y las máquinas herramientas (Diseño Asistido por Computadora/ Manufactura Asistida por Computadora (CAD/CAM) y Control Numérico Computarizado (CNC) disponibles. Esto puede suponer maquinar a velocidades de corte entre 5 y 10 veces superiores a las que se utilizan de manera convencional para cada material.



Podemos considerar que con el maquinado a alta velocidad se ha dado un paso importante hacia el maquinado óptimo de cada material. A medida que se vayan desarrollando y mejorando las máquinas, las herramientas, los programas de CAD/CAM, los CNC, se irá avanzando hacia la optimización general del maquinado, en el que cada material tendrá sus condiciones propias de corte, sus estrategias, sus herramientas, etc.

El maquinado a alta velocidad tiende a sustituir las pasadas de gran profundidad a baja velocidad de corte por muchas pasadas rápidas de menor profundidad de corte, obteniendo un considerable aumento de viruta desalojada (volumen de material por unidad de tiempo). Las altas velocidades de corte y los elevados avances disminuyen las fuerzas de corte gracias a espesores de viruta cada vez más pequeños [18]

Ventajas que ofrece el maquinado a alta velocidad:

- Disminución de las fuerzas de corte en los materiales dúctiles,
- posibilidad de maquinar paredes delgadas (0,2 mm).
- Mayor precisión de los contornos, mejor calidad superficial y tolerancias dimensionales más precisas,
- Reducción del tiempo de pulido.
- Maquinado de una sola pasada para el desbaste y acabado.
- Maquinado de paredes finas.
- Reducción del tiempo de maquinado y costo global.
- Disminución del coeficiente de rozamiento viruta-herramienta.
- Evacuación casi total del calor por medio de la viruta.
- Aumento en la vida de la herramienta.
- Posibilidad de maquinado de aceros duros (>50 HRC) como si fuera maquinado en caliente.



2.2 Teoría del maquinado.

El maquinado es un proceso de manufactura en el cual se usa una herramienta de corte para remover el exceso de material de una parte de trabajo, de tal manera que el material remanente sea la forma de la parte deseada. La acción predominante del corte involucra la deformación cortante del material de trabajo para formar una viruta; al removerse la viruta, queda expuesta una nueva superficie. El maquinado se aplica más frecuentemente para formar metales. Este proceso se muestra en la figura 2.1 [19]

El maquinado se puede aplicar a una amplia variedad de materiales de trabajo. Prácticamente todos los metales sólidos se pueden maquinar. Los plásticos y los compuestos plásticos se pueden cortar también por maquinado. Los cerámicos presentan dificultades debido a su alta dureza y fragilidad; sin embargo, la mayoría de los cerámicos se pueden cortar exitosamente mediante procesos de maquinado abrasivo. El maquinado se puede usar para generar cualquier forma geométrica regular, como superficies planas, agujeros redondos y cilindros, combinando varias operaciones de maquinado en secuencia se pueden producir formas de complejidad y variedad ilimitada.

El maquinado no es solamente un proceso, sino una familia de procesos. La característica común es el uso de una herramienta de corte que forma una viruta, la cual se remueve de la parte de trabajo. Para realizar la operación, se requiere movimiento relativo entre la herramienta y el material de trabajo. Este movimiento relativo se logra en la mayoría de las operaciones de maquinado por medio de un movimiento primario, llamado velocidad de corte, y un movimiento secundario, denominado el avance. La forma de la herramienta y su penetración en la superficie del trabajo, combinada con estos movimientos, produce la forma deseada de la superficie resultante del trabajo.

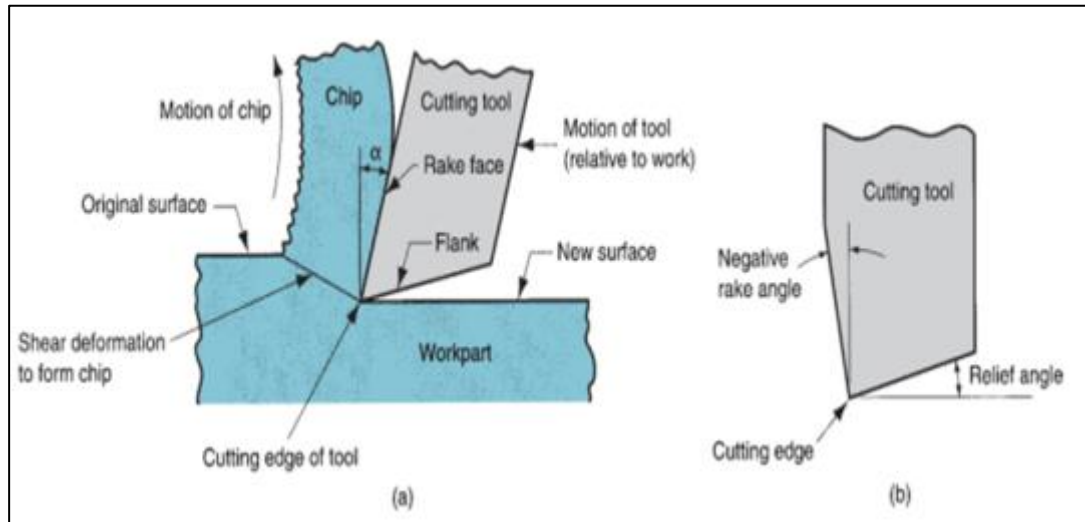


Fig. 2.1 (a) Sección transversal del proceso de maquinado, (b) Herramienta de corte [19]

2.3 Tipos de operaciones de maquinado.

Existen muchas clases de operaciones de maquinado, cada una de las cuales es capaz de generar una cierta geometría y textura superficial [20]. Los tres tipos más comunes del proceso de maquinado son el torneado, el taladrado y el fresado, los cuales se ilustran en la figura 2.2

En el proceso de torneado se utiliza una herramienta de corte con un borde cortante simple destinado a remover material de una pieza de trabajo giratoria para dar forma a un cilindro. El movimiento de velocidad del torneado lo proporciona la parte de trabajo giratoria y el movimiento de avance lo realiza la herramienta de corte, moviéndose lentamente en una dirección paralela al eje de rotación de la pieza de trabajo.

El proceso de taladrado se usa para crear un agujero redondo. Esto se realiza generalmente con una herramienta rotatoria que tiene dos filos cortantes. La herramienta avanza en una dirección paralela a su eje de rotación dentro de la parte de trabajo para formar el agujero redondo.



En el proceso de fresado, una herramienta rotatoria con múltiples filos cortantes se mueve lentamente sobre el material para generar un plano o superficie recta. La dirección del movimiento de avance es perpendicular al eje de rotación. El movimiento de velocidad lo proporciona la fresa rotatoria. Existen varias formas de fresado, siendo las dos básicas el fresado periférico y el fresado de frente.

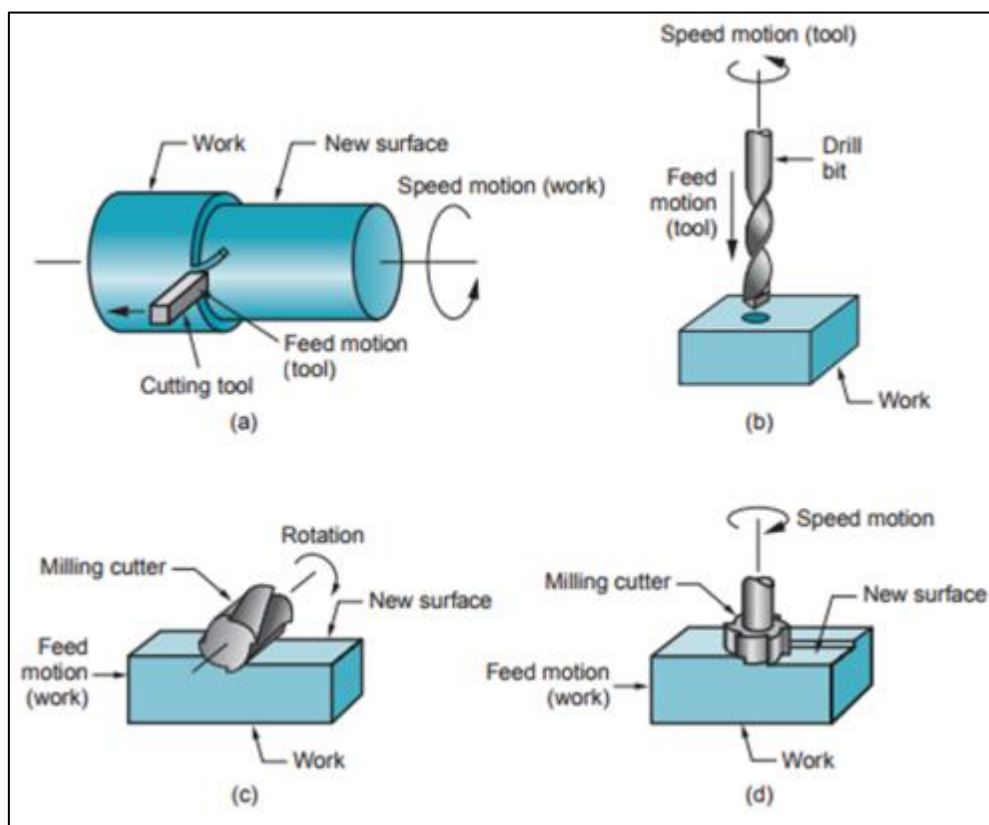


Fig. 2.2 Los 3 tipos más comunes del proceso de maquinado: (a) Torneado, (b) Taladrado, (c) Fresado periférico, (d) Fresado de frente [19]

2.4 Fresado

El fresado es un proceso de maquinado [19,20], que consiste principalmente en el corte del material que se mecaniza con una herramienta rotativa de varios filos, que se llaman dientes, labios o plaquitas de metal duro, que ejecuta movimientos



en casi cualquier dirección de los tres o cinco ejes posibles en los que se puede desplazar la mesa donde va fijada la pieza de trabajo. El eje de rotación de la herramienta de corte es perpendicular a la dirección del avance. La orientación entre el eje de la herramienta y la dirección de avance es una de las características que distingue el fresado del proceso de taladrado. En el fresado la herramienta de corte es alimentada en una dirección paralela a su eje de rotación.

Las principales diferencias entre procesos de fresado y otros maquinados son:

- Las interrupciones en el corte que se producen como los dientes de la fresa alternativamente se involucran y salen de la pieza de trabajo
- El tamaño relativamente pequeño de las virutas en el fresado
- La variación en el espesor dentro de cada viruta

2.4.1 Tipos de fresas

Fresas de corte varían ampliamente en tipo y tamaño y se clasifican en términos generales como: a) fresados periféricos y b) fresado frontal como se muestra en la figura 2.3

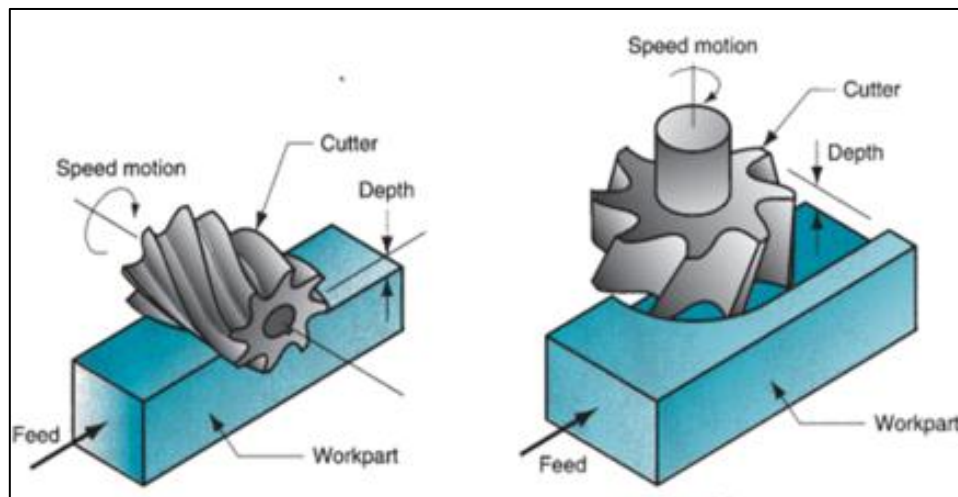


Fig. 2.3 Tipos de operación del fresado a) fresado periférico y b) fresado frontal [19]



2.4.2 Fresado periférico.

Se le llama también fresado cilíndrico o tangencial, se efectúa en fresadoras horizontales. La geometría más común de la operación del fresado periférico se muestra en la figura 2.4. Puede observarse el ancho de corte (b), coincide con el ancho de la fresa (B), esta situación no tiene por qué producirse en todas las operaciones de fresado cilíndrico cumpliéndose en cualquiera de los casos que (b) es menos o igual que (B). El espesor de la viruta deformada (a_p) no es constante, alcanzando su valor máximo en la situación marcada en la figura 2.4. A consecuencia de ello, tampoco son constantes la sección de viruta (a_c), la fuerza de corte (F_c) y la potencia (w).

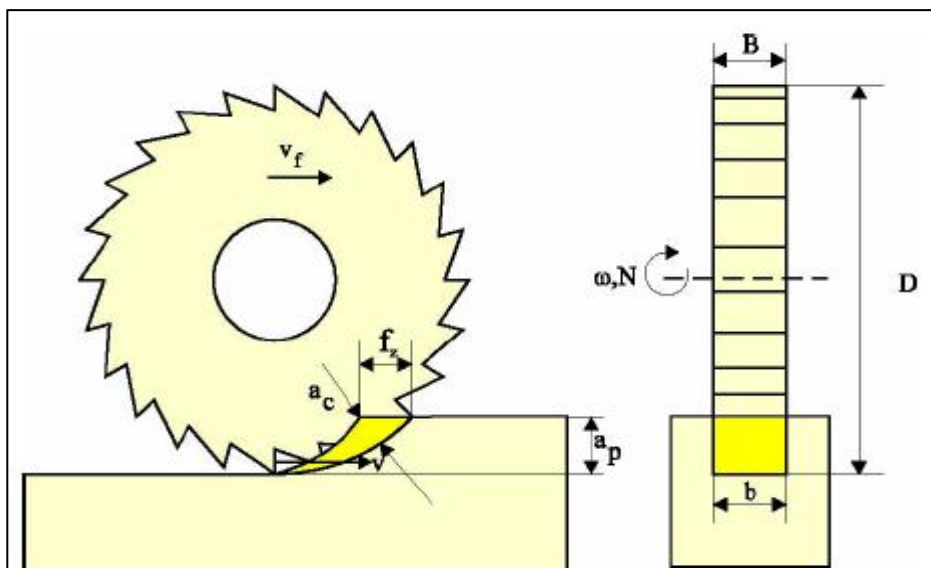


Fig. 2.4 Fresado periférico [20]

En función de los sentidos de las velocidades de corte de la herramienta y de avance de la pieza, el fresado periférico puede realizarse en dos formas, que son el fresado en oposición y el fresado en concordancia. **El fresado en oposición**, los sentidos de ambas velocidades son opuestos, tal y como se indica en la figura 2.5 (a). Por su parte, en el **fresado en concordancia** los sentidos de ambas



velocidades son coincidentes como se muestra en figura 2.5 (b). En el fresado de oposición, el crecimiento del espesor de viruta se produce de una forma más suave que en el fresado en concordancia. En este último, el valor de espesor de la viruta máximo se alcanza prácticamente en el inicio del corte por parte del filo, lo cual supone un impacto más brusco que origina mayores vibraciones en las guías de la maquina e incrementa la probabilidad de rotura del filo. Por otro lado, el fresado de oposición tiende a levantar la pieza de su apoyo en la mesa, mientras que el fresado en concordancia tiene a reforzar dicho apoyo.

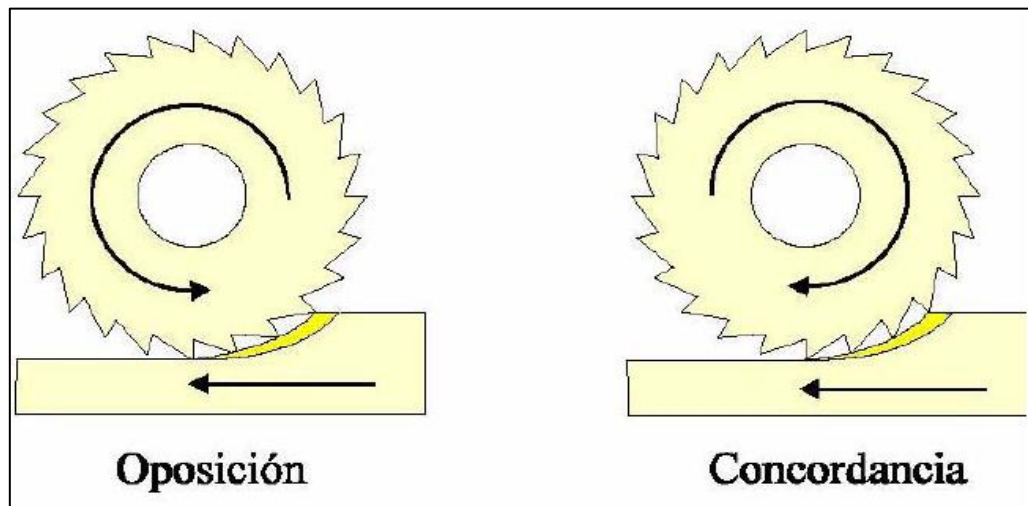


Fig. 2.5 a) Fresado de oposición

b) Fresado de concordancia [20]

2.4.3 Fresado frontal

El fresado frontal caracterizado por la perpendicularidad entre el eje de rotación de la fresa y la superficie, suele efectuarse en fresadoras verticales y el maquinado es realizado por los dientes del cortador en ambos el extremo y la periferia exterior del cortador [20]. Existen varios tipos de fresado frontal mostrados a continuación en la figura 2.6

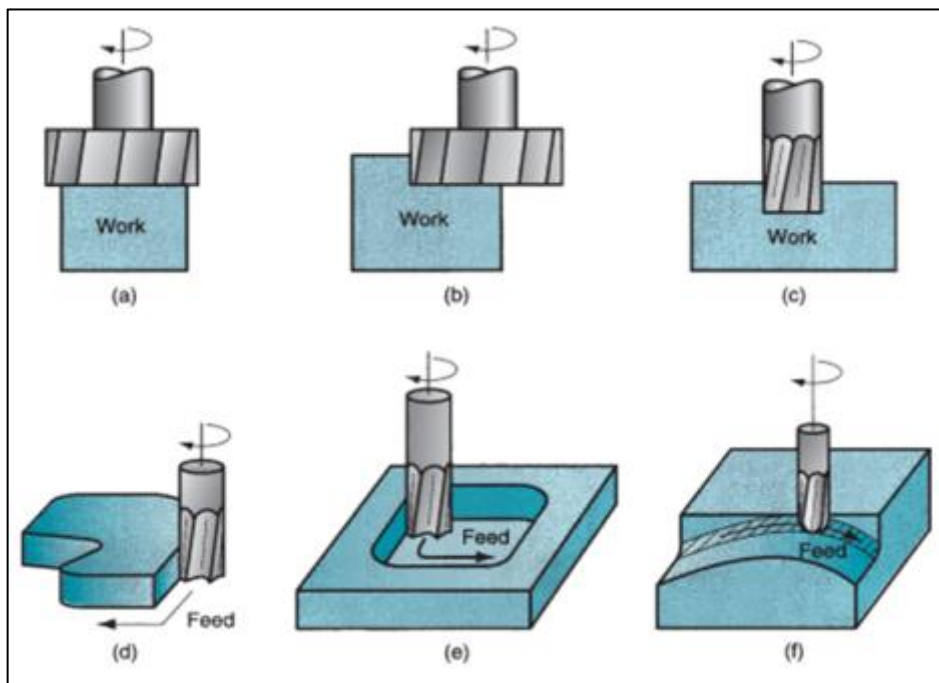


Fig. 2.6 Tipos de fresado frontal: (a) fresado convencional, (b) frontal parcial, (c) Ranurado, (d) Perfilado, (e) Cavidades, (f) Contorno superficial [19]

2.4.4 Endmill

La fresa de corte (End mill) se define como una herramienta de corte giratoria, con mango, y que dispone de dientes a lo largo de su periferia. La herramienta gira (en una máquina fresadora) para cortar el lado de la pieza de trabajo con los filos de su perímetro y rebajar la superficie superior de la pieza de trabajo. Este tipo de herramientas o fresa es el más utilizado para el tipo de proceso de fresado periférico, es el más común en la industria para procesos de maquinado en máquinas de control numérico (CNC) [21]

Las capacidades de la fresa como herramienta de corte serán diferentes dependiendo del número de labios (dientes) y sus diferentes atributos de ángulos y el recubrimiento que se establezca. La selección de una forma adecuada de la herramienta de corte se recomienda en los procesos de corte de alta velocidad.



El número de labios es uno de los factores importantes que determinan la capacidad de la fresa. La dureza de la herramienta se incrementará cuantas menores longitudes de corte se utilicen y también las capacidades de corte se verán mejoradas. Por lo tanto, es más ventajoso utilizar una menor longitud de corte tanto como sea posible, pero tiene que estar dentro del valor determinado para la medida de corte.

2.5 Introducción al fresado en 5 ejes.

En el pasado, las piezas se producían con forma simple. Las superficies eran maquinadas en máquinas convencionales. Esto a menudo requería un enlace lineal simple de los dos movimientos, el cual podría ser proporcionado en una forma mecánica (por ejemplo rotación y translación en el torneado de un cilindro). Hoy en día, las superficies de forma complejas también son maquinadas [22]. Estas formas son conocidas en la literatura como **FFS** (Free Form Surfaces) “Superficies de Forma Libre”. Estas formas no pueden ser descritas analíticamente con facilidad.

Las FFS son producidas en centros de fresado de CNC, por lo tanto, es posible producir una forma completa en una maquina en una sola sujeción. El mayor uso para producir estas formas son las maquinas fresadoras de 5 ejes.

Los componentes son diseñados en un sistema CAD. Nuevas técnicas en el CAD han sido desarrolladas para superar las limitaciones percibidas en la práctica convencional, particularmente en el tratamiento de la complejidad de las partes. El diseño asistido por computadora permite al diseñador abordar una tarea en la práctica de forma rápida y precisa [23].

2.5.1 Estructura del fresado de 5 ejes.

El método de fresado 5 ejes es usado actualmente en la manufactura de partes



con superficies complejas de maquinar, ya que este método logra aumentar la exactitud y precisión de los componentes y lograr obtener tolerancias muy cerradas usando las herramientas adecuadas y material según la parte a maquinar o aplicación. Todas las estructuras de las máquinas son invenciones que han comenzado de acuerdo con las necesidades industriales. El movimiento de la herramienta en un espacio distingue 2 fases:

- Posicionamiento: es el desplazamiento del punto de referencia (centro de gravedad) de una posición espacial a otra.
- Dirección: es la orientación angular espacial de la herramienta con el tiempo de la pieza de trabajo a un punto de referencia.

La estructura universal de una máquina-herramienta tiene seis grados de libertad [22]. Puede mover la herramienta en cualquier posición en el espacio. Cuando se utiliza una herramienta rotativa en el mecanizado (fresado), la estructura de la máquina tiene cinco grados de libertad. En la práctica, significa controlar cinco (5D) ejes de la máquina. En general, la disposición del eje 5D de la estructura de la máquina se puede realizar de tres maneras:

- Los movimientos de traslación proporcionan la posición de la herramienta y los movimientos de rotación proporcionan para dirigir el componente. La herramienta se mueve en una forma de traslación en los ejes X, Y, Z y el componente gira alrededor de dos ejes como se muestra en figura 2.7
- Los movimientos de rotación ayudan a dirigir la herramienta y los movimientos de traslación aseguran el posicionamiento del componente. La herramienta se gira alrededor de dos ejes y los movimientos de los componentes se trasladan en los ejes como se muestra en figura 2.8



- Varias combinaciones de los dos casos anteriores (figura 2.9)

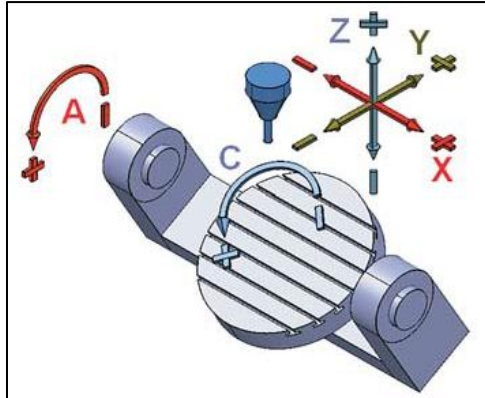


Fig. 2.7 Estructura de maquina 5 ejes con mesa giratoria [23]

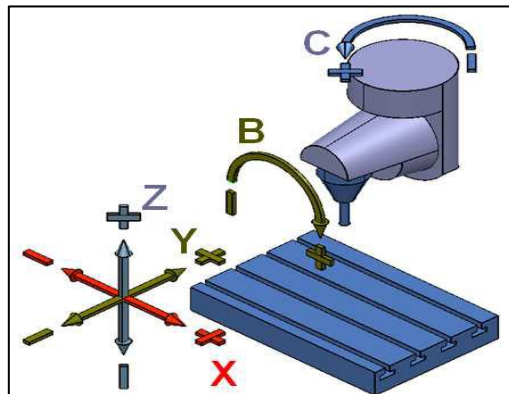


Fig. 2.8 Estructura de maquina 5 ejes con rotación en la herramienta en 2 ejes. [23]

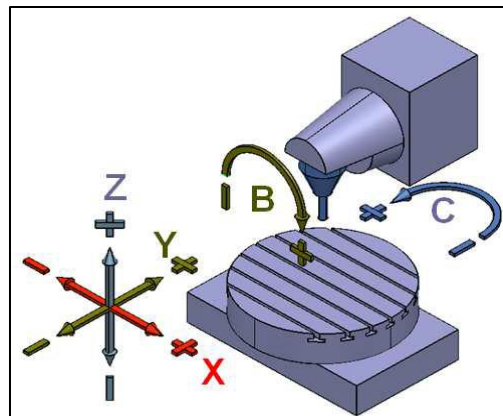


Fig. 2.9 Estructura de maquina 5 ejes con rotación en la herramienta y rotación en la pieza. [23]



2.5.2 Fresado 5 ejes con cortador hemisférico

La estrategia de fresado más aplicada en el maquinado de 5 ejes es la constante Z. La situación para el fresado longitudinal ascendente o descendente con el ángulo de avance (lead angle) de la herramienta, es muy importante que se analice su situación para maquinados de 5 ejes como se muestra en la figura 2.10

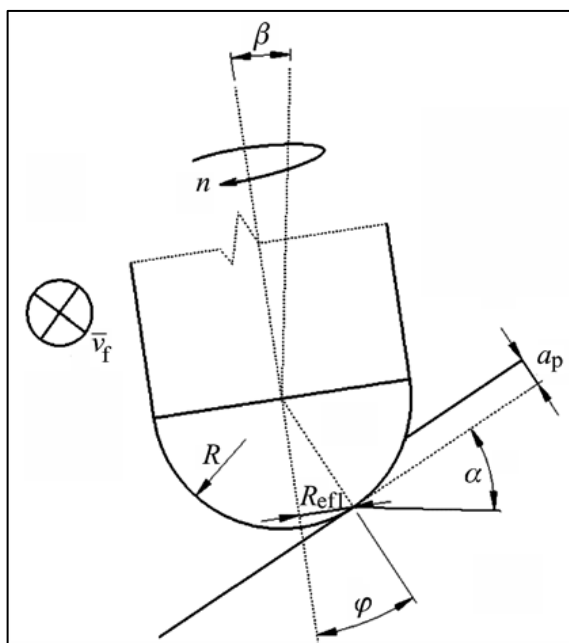


Fig. 2.10 Fresado ascendente longitudinal para 5 ejes [23]

El ángulo de avance del fresado del eje vertical β y el ángulo de contacto φ del cortador con la superficie maquinada. El ángulo de contacto φ es calculado de la ecuación siguiente:

$$\varphi = \alpha - \beta$$

En donde:

Φ = ángulo de contacto del cortador con la superficie maquinada, °

α = ángulo de inclinación de la superficie de fresado, °

β = ángulo de avance del fresado de eje vertical, °



Una vez conocidos estos parámetros, podremos calcular el radio efectivo del cortador (R_{ef1}) a la superficie maquinada de la siguiente ecuación:

$$R_{ef1} = R * \sin\phi$$

En donde:

R_{ef1} = radio efectivo del cortador en la superficie maquinada, pulgadas

R = radio del cortador, pulgadas

ϕ = ángulo de contacto del cortador con la superficie maquinada, °

2.5.3 Selección de las condiciones de corte.

Las condiciones de corte en una operación de maquinado consisten en la velocidad de corte, el avance, la profundidad de corte y el fluido para corte (si se usa o no, y qué tipo de fluido). El factor dominante en la elección sobre los fluidos para corte son generalmente las consideraciones sobre las herramientas. La profundidad de corte se predetermine frecuentemente por la geometría de la pieza de trabajo y la secuencia de operación [25]

Un problema práctico en maquinado es seleccionar las condiciones de corte apropiadas para una operación dada. Esta es una de las tareas de planeación de procesos. Para cada operación se deben tomar decisiones acerca de la máquina-herramienta, de la herramienta de corte y de las condiciones de corte. Estas decisiones deben considerar la maquinabilidad de la parte de trabajo, la geometría de la parte, el acabado superficial y así sucesivamente.

Muchos trabajos requieren una serie de operaciones de desbaste seguidas de una operación final de acabado. En las operaciones de desbaste, la profundidad se hace tan grande como sea posible dentro de las limitaciones de la potencia disponible, la máquina-herramienta, la rigidez de la instalación, la resistencia de la



herramienta de corte y otros factores. En el corte de acabado, se fija la profundidad para alcanzar las dimensiones finales de la parte.

La selección de la velocidad de corte se basa en aprovechar mejor la herramienta de corte particular, lo cual significa normalmente escoger una velocidad que rinda una alta velocidad de remoción de material y que sea conveniente para una vida larga de la herramienta.

El primer paso a establecer para las condiciones de corte es seleccionar la profundidad de corte. Esta será limitada por el monto de metal a ser maquinado de la pieza, la capacidad de la máquina, la rigidez de la pieza y el cortador. La profundidad de corte tiene el menor efecto sobre la vida útil de la herramienta, por lo que siempre debe usarse la mayor profundidad de corte posible.

El segundo paso es seleccionar el avance (feed rate). La potencia disponible debe ser suficiente para obtener la profundidad de corte requerida en el avance seleccionado. Se debe seleccionar el máxima avance posible que producirá un acabado superficial aceptable.

El tercer paso es seleccionar la velocidad de corte (SFM). Aunque existen tablas que proporcionan velocidades de corte recomendadas y avances para muchos materiales, la experiencia en el maquinado de un cierto material es la mejor base para ajustar las velocidades de corte dadas a un particular trabajo. Sin embargo, en general, la profundidad de corte debe seleccionarse primero, seguido del avance y por último la velocidad de corte [25]. Las mejores fuentes de datos para obtener avances y velocidades para una específica herramienta, aplicación o material son los proveedores de herramientas. Mucha de esta información es encontrada en las hojas técnicas de las herramientas o en los portales en internet de cada proveedor.



Otra fuente de información para obtención de velocidades de corte y avance son las paqueterías de programas CAD/CAM ya que se han vuelto cada vez más sofisticados y a menudo proporcionan buenos datos y muy confiables.

2.5.4 Fórmulas para calcular avance, velocidad de corte y velocidad de giro del husillo.

Como se ha mencionado anteriormente, para obtener las condiciones de corte apropiadas para realizar un maquinado en fresadoras de 5 ejes de control numérico (CNC) se requiere conocer los parámetros de las velocidades requeridas a maquinar cierto material, estos parámetros son obtenidos de los programas de CAM o de las tablas proporcionadas por el fabricante de las herramientas. Sin embargo, también podemos calcular estos parámetros por medio de fórmulas ya establecidas en los manuales de maquinado. Esta es la fórmula estandarizada que se utiliza [24,25] para calcular la velocidad del husillo (spindle speed):

$$S = 12 * SFM / \pi * D$$

En donde:

S= Velocidad de rotación del husillo, Rpm

SFM= Velocidad de corte en pies por minuto (ft/min)

D= Diámetro de la herramienta, pulgadas

12= constante para convertir pies a pulgadas

π = constante Pi (3.1416)

Si se desea calcular la velocidad de corte de superficie (SFM), utilizando la formula anterior despejamos:

$$SFM = S * D * \pi / 12$$



Para calcular el avance de corte en el material de cualquier proceso de fresado, se utiliza la siguiente formula:

$$F = S * f_t * N$$

En donde:

F= Avance de corte en pulgada/min

S= Velocidad de rotación del husillo en Rpm

f_t = carga de la viruta en pulgada por diente (in/tooth)

N= Numero de dientes (flutes) del cortador

2.5.5 Factores para selección de cortadores para aluminio

El tipo de fresa más adecuado para una operación de fresado en particular depende de factores tales como el tipo de corte que se realizará, el material que se va a cortar, la cantidad de piezas que se maquinarán y el tipo de fresadora. Para el mecanizado rápido que se realiza en las máquinas herramientas de Control Numérico es conveniente que se utilicen herramientas especiales para el mecanizado del aluminio. Se distinguen de las empleadas en el mecanizado del acero en que tienen mayores ángulos de desprendimiento y un mayor espacio para la evacuación de la viruta, así como unos rebajes para que la viruta fluya mejor. La mayoría de las herramientas de filo múltiple como por ejemplo las fresas, tienen pocos dientes. Hay tres grandes familias de herramientas de corte para el mecanizado del aluminio:

- Acero Rápido (HSS)
- Carburo (Solid Carbide)
- Diamante



Las herramientas de acero rápido son apropiadas para el mecanizado de aleaciones de aluminio con bajo contenido en silicio. Permite el uso de grandes ángulos de desprendimiento para obtener unas mejores condiciones de corte. El acero rápido es más económico que el metal duro cuando la maquinaria de que se dispone no permite el uso de las velocidades de corte alcanzables con el carburo metálico. En el mecanizado de aluminios con elevado contenido de silicio el desgaste de este tipo de herramientas se acelera. Estas herramientas se utilizan principalmente en la industria de carpintería metálica para el mecanizado de perfiles extrusionados.

Las herramientas de metal duro ofrecen la ventaja de una mayor duración de la herramienta. Se emplean en el mecanizado de aluminios con elevado contenido en silicio, así como para los mecanizados a altas velocidades de corte. Las fundiciones de aluminio, con la presencia de cristales de silicio de elevada dureza requieren obligatoriamente el uso de herramientas de carburo metálico. Dentro de los carburos metálicos los distintos fabricantes tienen distintas gamas y calidades, en función de las condiciones de corte requeridas.

Las herramientas de diamante se caracterizan por su elevada duración, incluso si se emplean en el mecanizado de aleaciones con un elevado contenido en silicio. Suelen emplearse para trabajos de mecanizado en piezas que generen mucha viruta [26]

2.5.6 Fluidos para corte.

Cuando se utilizan herramientas de acero de alta velocidad, se genera calor al realizarse el corte entre la herramienta y el material de la pieza de trabajo debido a la gran fricción que existe entre ambas [27,28]



Debido a esto se incrementa la temperatura de la pieza y de la herramienta de corte, siendo mucho mayor la de la herramienta, ocasionándose un daño tanto a la herramienta como a la pieza de trabajo. Estos daños en las herramientas ocasionados por las altas temperaturas se presentan cuando la temperatura de trabajo se acerca o excede la temperatura del tratamiento térmico que se le había aplicado a la herramienta, por consiguiente, el material de la herramienta se ablanda perdiendo así el filo y su dureza.

Un fluido para corte es un líquido o gas que se aplica directamente a la operación de maquinado para mejorar el desempeño del corte. Los dos problemas principales que atienden los fluidos para corte son:

- La generación de calor en las zonas de corte y fricción.
- La fricción en las interfaces herramienta-viruta y herramienta-trabajo.

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.

Características de los líquidos para corte:

- Buena capacidad de enfriamiento
- Buena capacidad lubricante
- Estabilidad (larga duración sin descomponerse)
- No tóxico, no inflamable
- Transparente (permite al operario ver lo que está haciendo)
- Viscosidad relativamente baja



A continuación se muestra la tabla 2.1 con los fluidos más comunes para procesos de maquinado en máquinas de control numérico.

Fluido	Características
Aceite Activo para corte	Aceites minerales sulfurados (0.5 a 0.8% de S) Aceites minerales sulfoclorinados (3% S y 1% Cl) Mezclas de aceites grasos sulfoclorinados (más del 8% de S y 1% Cl)
Aceites de corte inactivos	Aceites minerales simples Aceites grasos o animales Mezclas de aceites animales y minerales Mezclas de aceites animales y minerales sulfurados
Aceites emulsificantes (solubles)	Aceites minerales solubles al agua. Contienen una materia Parecido al jabón que permite la dilusión en el agua se agregan de los concentrados de 1 a 5 partes de concentrado por cada 100 partes de agua
Fluidos sintéticos para el corte	Emulsiones estables que contienen un poco de aceite y se mezclan con facilidad con el agua. Existen varios tipos de fluidos sintéticos para corte, los mejores son aquellos conocidos como de alta precisión y funcionan con reacciones químicas de acuerdo con el material que estén enfriando.

Tabla 2.1 Fluidos más comunes para corte [29]

2.5.7 Maquinabilidad.

Las propiedades del material de trabajo tienen una influencia significativa sobre el éxito de la operación de maquinado. Estas propiedades y otras características del trabajo se resumen frecuentemente en el término maquinabilidad, que denota la facilidad relativa con la cual se puede maquinar un material (por lo general metal) usando las herramientas y las condiciones de corte apropiadas.

Para evaluar la maquinabilidad se utilizan varios criterios y los más importantes son los siguientes:

- Vida de la herramienta
- Fuerzas y potencia
- Acabado superficial
- 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. Muchos materiales de trabajo y sus factores afectan el desempeño del maquinado [30].

Las propiedades mecánicas de un material de trabajo que afectan la maquinabilidad incluyen la dureza y la resistencia. Al incrementarse la dureza, aumenta el desgaste abrasivo y la vida de la herramienta se reduce. La resistencia se indica por lo general como resistencia a la tensión, aun cuando el maquinado implica esfuerzos cortantes. Al aumentar la resistencia del material, se incrementan las fuerzas de corte, la energía específica y la temperatura de corte, haciendo que el material sea más difícil de maquinar



Capítulo 3. Metodología

3.1 Introducción.

En este capítulo se especifica la ruta de maquinado que se utilizó para maquinar un turbo, con el proceso de manufactura más óptimo y la generación del código G para ser introducido en la máquina CNC. Así como también, se especifica el material y equipo utilizado para la experimentación. Se explica el proceso de maquinado de un turbo y la preparación de los aditamentos de montaje para colocar el material a maquinar. Así como también, se explica detalladamente como fabricar preformas antes del inicio del maquinado de los turbos en la maquina 5 ejes.

Para encontrar los parámetros más óptimos para el maquinado de los álabes del turbo, se utilizó la metodología del diseño de experimentos, en el cual, se realizaron varios experimentos con los factores tales como velocidad de husillo, velocidad y profundidad de corte, avance de corte. Al utilizar el diseño de experimentos se pudo encontrar las variables significativas que afectan directamente nuestro proceso de maquinado para reducir el tiempo de ciclo lo mejor posible sin utilizar herramientas especiales, ni material a maquinar especial como el utilizado en la industria para este tipo de piezas (titanio).

Se experimentó con apoyo del programa MasterCAM en donde se utilizaron las herramientas incluidas en el paquete para maquinar superficies complejas, obteniendo un resultado aceptable y muy apegado a los obtenidos a nivel industrial actualmente, utilizando herramientas convencionales, se logró optimizar el tiempo de ciclo del maquinado (comparándolo contra el tiempo de ciclo en la industria) y resultado aceptable dimensionalmente (con tolerancias en los álabes de espesor y alturas de ± 0.002 ”).



Análisis en la manufactura de superficies complejas a través del diseño de experimentos



El resultado obtenido en este estudio, nos permitirá realizar en cualquier taller de maquinado que cuente con alguna máquina de 5 ejes, la realización de turbos a nivel de producción en masa, cumpliendo con las dimensiones y con un tiempo de ciclo de maquinado aceptable, ya que se tiene historial de la problemática que es fabricar este tipo de superficies complejas hoy en día en los talleres de maquinado, lo cual hace que no sea factible para los talleres adquirir este tipo de proyectos y así poder abarcar más el mercado a nivel industrial. Esta ruta puede ser ajustada a cualquier superficie compleja dibujada en algún programa de diseño (CAD) y transferida al programa de manufactura MasterCAM para hacer los ajustes en la ruta de maquinado sugerida en este estudio. Se pueden maquinar superficies complejas como álabes para turbinas, álabes para compresores, turbos, etc., para industria aeroespacial y automotriz.



3.2 Ruta de maquinado generada en MasterCAM para maquinar álabes para turbocompresores.

3.2.1 Proceso de desbaste de la pieza (Roughing)

- Se agregan 2 operaciones de maquinado para el desbaste de la pieza de trabajo en la opción Blade expert (ver figura 3.4). Como se muestra en la figura 3.1, se selecciona la trayectoria de preparación de la pieza a maquinar (stock setup) en el programa MasterCAM, se introducen los parámetros mostrados en la figura 3.1, para nuestro estudio y máquina 5 ejes seleccionada.

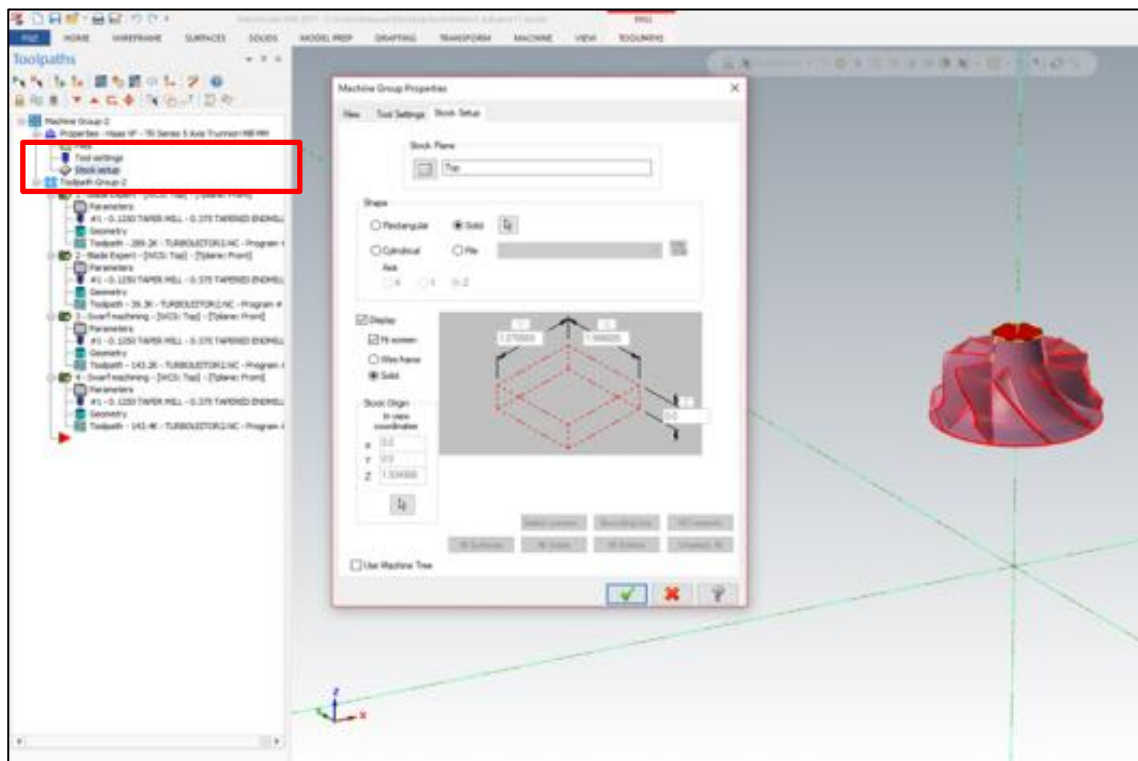


Fig. 3.1 Inicio de la preparación de la pieza para realizar las operaciones de manufactura [fuente propia]



Una vez obtenidos los ceros de máquina y pieza en la preparación en la maquina 5 ejes, se validan simulando la preparación en el programa, introduciendo el aditamento especial para montar la pieza a maquinar (figura 3.2), esto con el fin de evitar alguna colisión con la herramienta de corte y la pieza. Una vez comprobado la preparación de la altura de la pieza, se introducen los valores obtenidos en la ventana de propiedades de maquinado (machine group properties) como se muestra en la figura 3.1

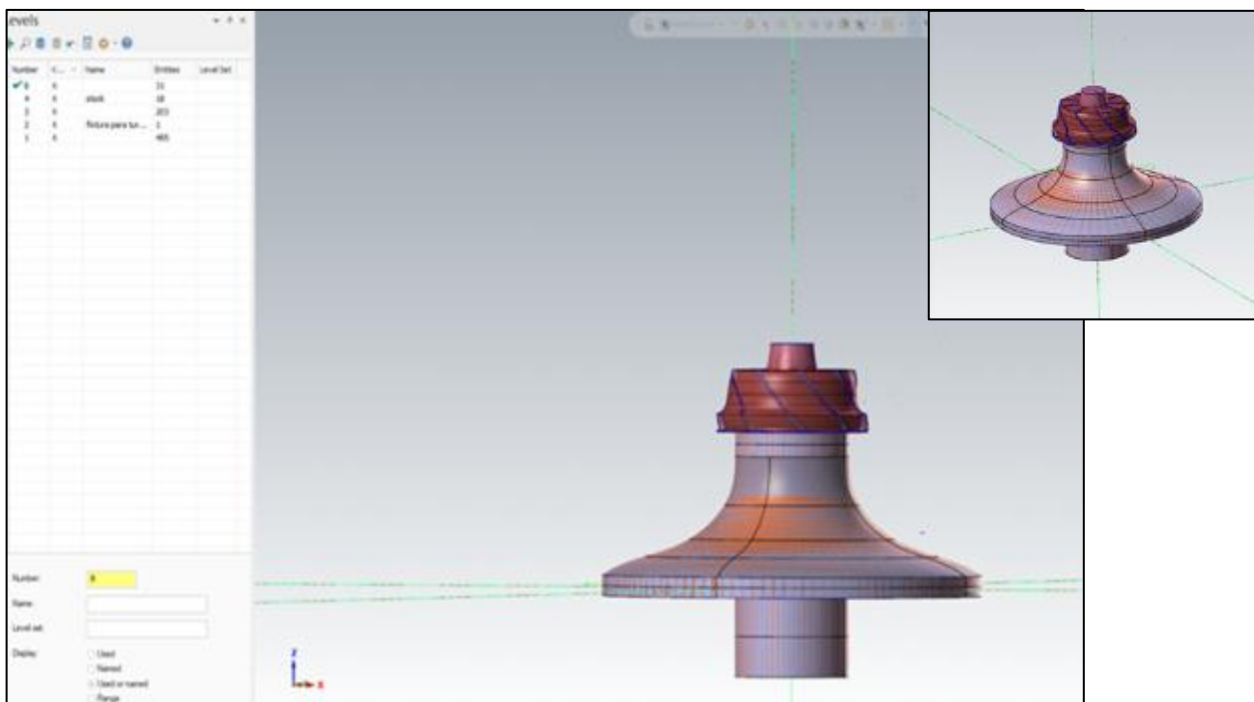


Fig. 3.2 Comprobación de altura de pieza de trabajo con el aditamento de montaje [fuente propia]

- Definimos la herramienta de corte a utilizar para el maquinado en la pestaña editar herramienta (edit tool). Se mostrará un cuadro como se muestra en la figura 3.3, en donde definiremos la geometría de la herramienta y sus propiedades.



MasterCAM no cuenta con herramientas cónicas (Tapered Endmill) cargadas en su librería, si este es el caso, deberán ser creadas todas las herramientas cónicas que se vayan a requerir para maquinar las piezas y agregarlas en la librería.

A continuación se muestra la ventana en la figura 3.3, para definir una herramienta nueva con los datos requeridos para generar una herramienta única no cargada en la librería del programa. En esta sección se introducen los datos técnicos del cortador tales como el diámetro de la herramienta, diámetro de la punta de corte, avance de corte, ángulo de la herramienta cónica, número de dientes, material de la herramienta, etc.

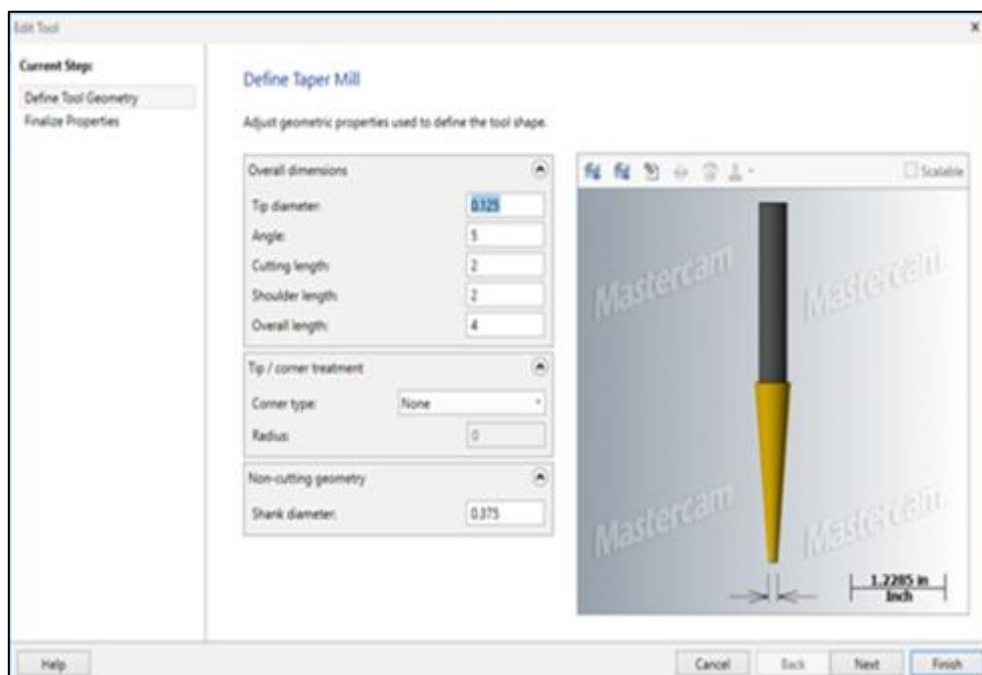


Fig. 3.3 Definiendo una herramienta nueva [fuente propia]

- Se genera la primer operación de maquinado para remover material a la pieza de trabajo. Seleccionamos la trayectoria Blade expert en la sección del programa multiejes (ver figura 3.4) para iniciar el primer maquinado de



desbaste al cuerpo de la pieza (Hub), así como también, realizará una preforma a los álabes de la pieza, para después continuar con el proceso de maquinado de fabricación de álabes. Esta operación removerá el material en una sola pasada alrededor de la pieza.

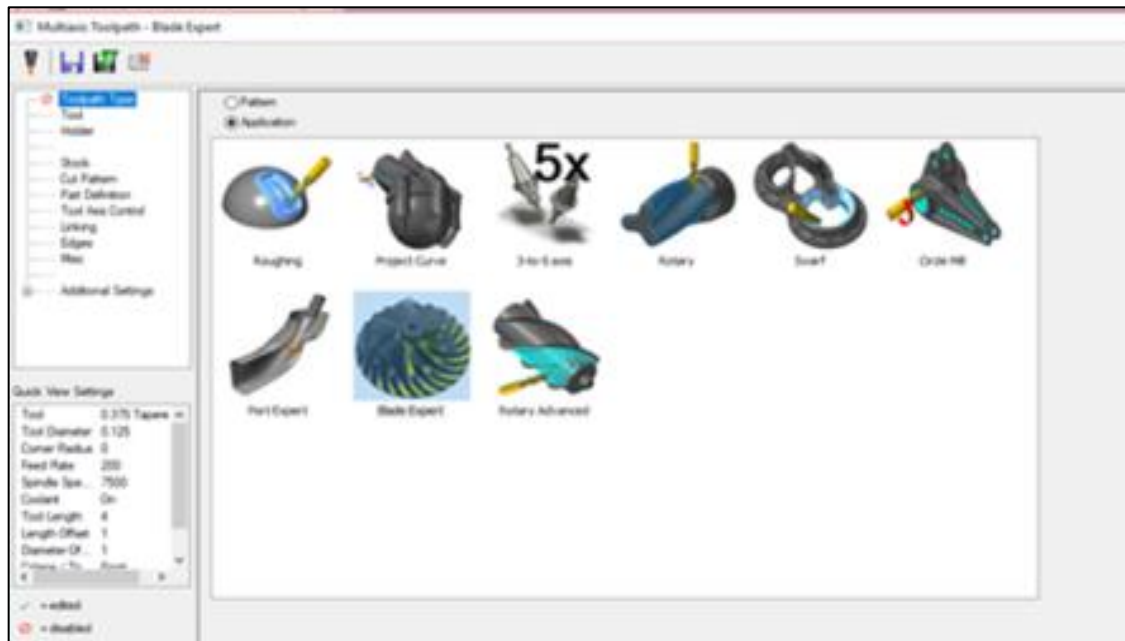


Fig. 3.4 Ventana de la aplicación Blade expert en la sección multiejes. [fuente propia]

- Se mostrará una ventana para introducir los parámetros obtenidos en la experimentación del diseño de experimentos (ver figura 3.5), en donde se tiene la velocidad del husillo (Spindle speed), el avance de corte (feed rate), velocidad de corte (SFM), profundidad de corte (Plunge rate) y la remoción de material (FPT).

Una vez introducidas las condiciones de corte para la herramienta, se define el patrón de corte. Se define la estrategia de corte y método para el desbaste del material. Esta operación removerá el material en una sola pasada para maquinar la forma del cuerpo de la pieza de los álabes. El



método con el mejor resultado es el maquinado en zigzag. La estrategia y patrón de corte se muestran en la figura 3.6

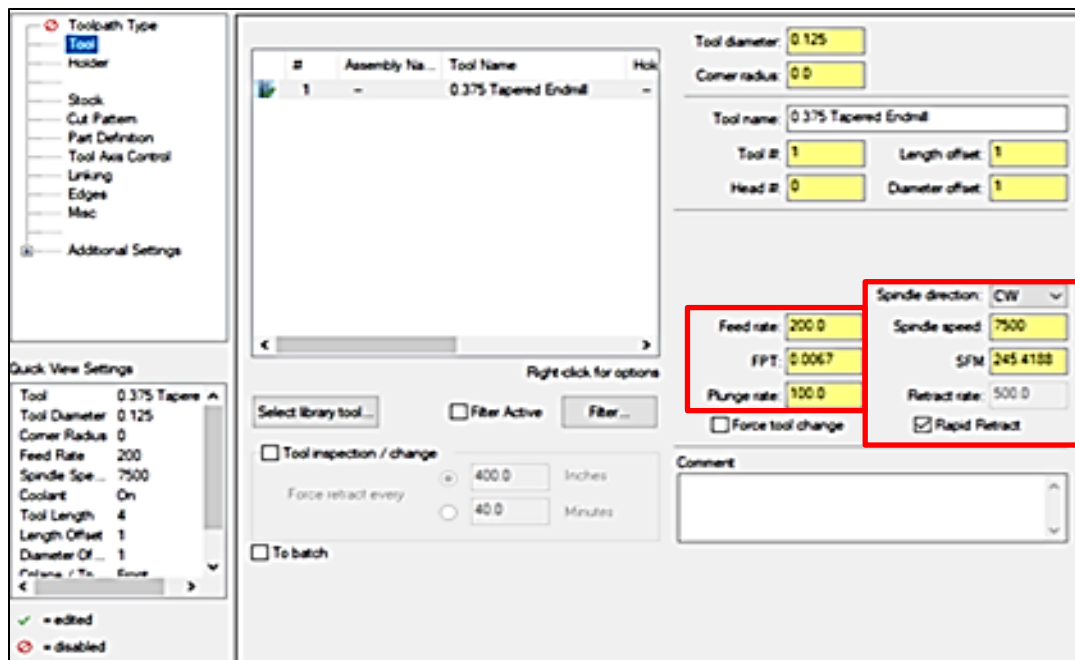


Fig. 3.5 Definiendo condiciones de corte de la herramienta [fuente propia]

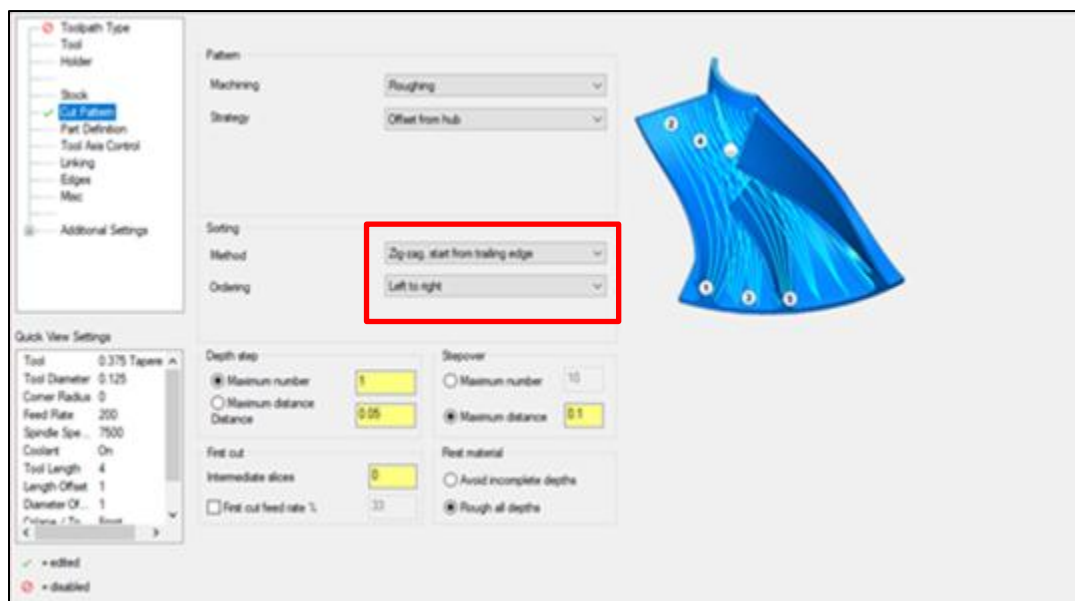


Fig. 3.6 Definiendo el patrón de corte en la pieza de trabajo [fuente propia]



- La definición de la parte de trabajo (Part definition) se introducirán la tolerancia para los álabes, el número de segmentos a maquinar y el material a dejar para realizar el acabado a la pieza.

Es muy importante que en el cuadro de número de segmentos solamente se escriba 1 (cuadro naranja), ya que si ponemos el número total de segmentos (en este caso sería los números de álabes del turbo), el programa lo traducirá como el número de vueltas o ciclos a maquinar, girando la herramienta alrededor de la pieza varias veces repitiendo la operación. Esto incrementará demasiado el tiempo de ciclo del maquinado de la pieza, ya que el cortador estará girando alrededor de la pieza simulando que está cortando material cuando en realidad, estará solamente girando y cortando al aire. El exceso de material se asignará dependiendo la calidad del acabo requerido. Se recomienda dejar 0.025" en los álabes y 0.006" en el cuerpo de la pieza (ver figura 3.7).

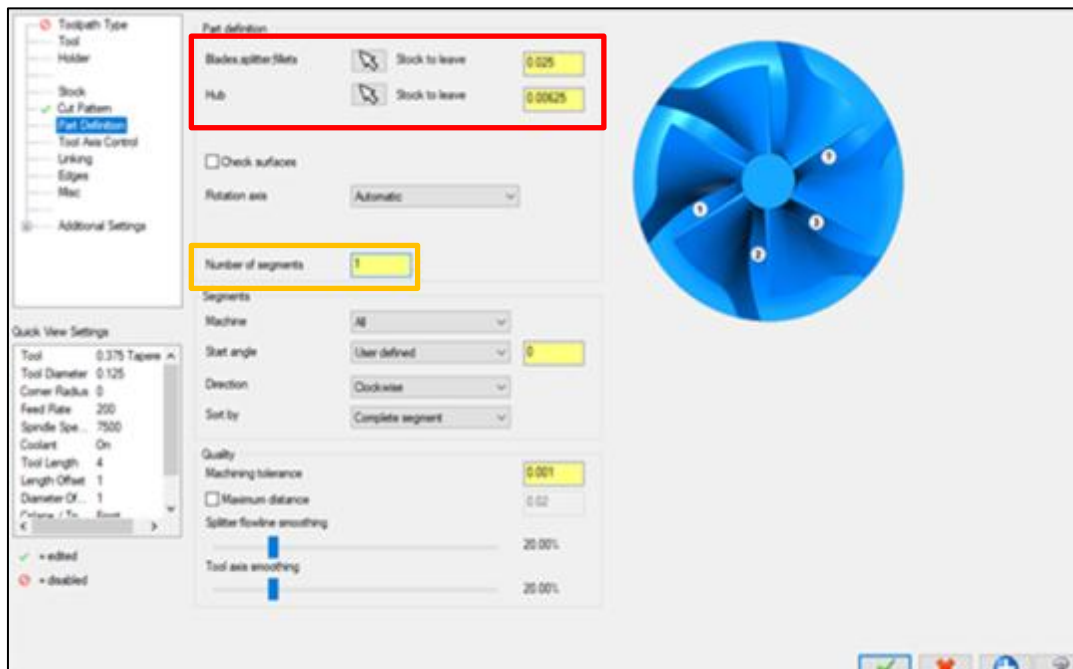


Fig. 3.7 Ventana de definición de la parte de trabajo [fuente propia]



En la sección de blades seleccionamos el ícono de stock to leave marcada en el cuadro rojo de la figura 3.7, para poder realizar esta operación, mostrando todas las aletas seleccionadas (ver figura 3.8), esto es para definir el enlace del maquinado que la herramienta seguirá en la máquina 5 ejes, removiendo el material y dejando una porción de material para después realizar el acabado a la pieza.

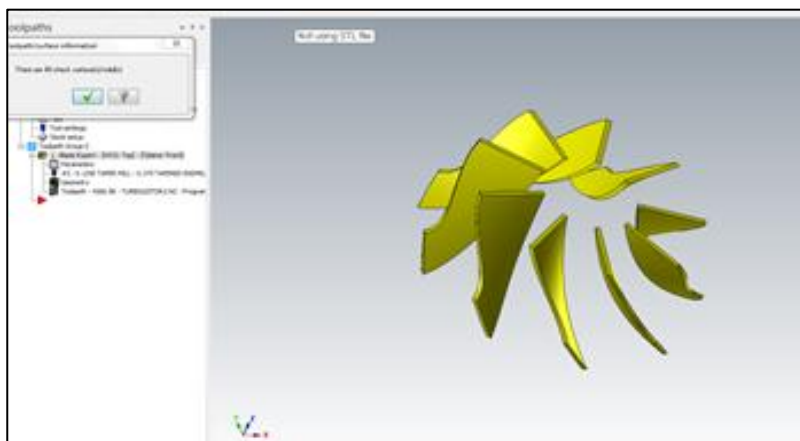


Fig. 3.8 Enlace del maquinado para los álabes del turbo [fuente propia]

Después se selecciona la sección del Hub, presionando la pestaña del stock to leave para definir el enlace de maquinado en la superficie del cuerpo o piso como se muestra en la figura 3.9.

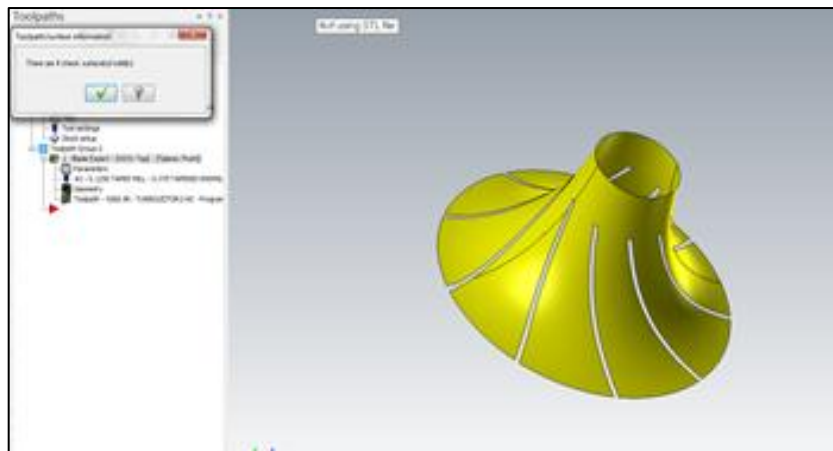


Fig. 3.9 Enlace del maquinado para el cuerpo del turbo [fuente propia]



3.2.2 Proceso de maquinado Swarf

- Se agrega la tercera operación de maquinado, este es el proceso de fresado swarf, en este proceso maquinaremos los álabes de nuestra pieza de trabajo. Una vez terminado el proceso de desbaste del cuerpo de la pieza de trabajo, se le agregó otra operación de maquinado para un desbaste total del cuerpo y un preformado para los álabes. Seleccionamos la aplicación de Swarf milling en el programa MasterCAM (ver figura 3.10) para iniciar el maquinado y formado de los álabes.

Una vez seleccionado el icono, se abrirá la ventana para introducir los parámetros apropiados para este proceso de maquinado, el cual también fue obtenido del diseño de experimentos realizado en la experimentación, estos parámetros son velocidades de corte, avance de corte y revoluciones del husillo como se muestra en la figura 3.11, el proceso será hecho en una sola pasada en donde removerá toda la viruta y formará todos los radios de los álabes de la pieza de trabajo.

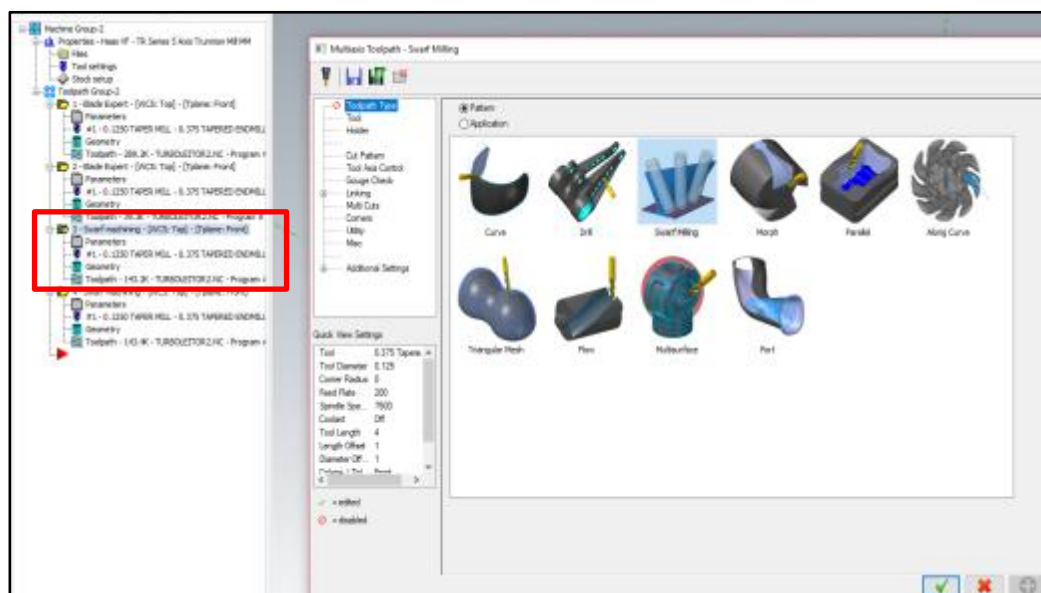


Fig. 3.10 Ventana de la aplicación Swarf Milling en la sección de multiejes [fuente propia]

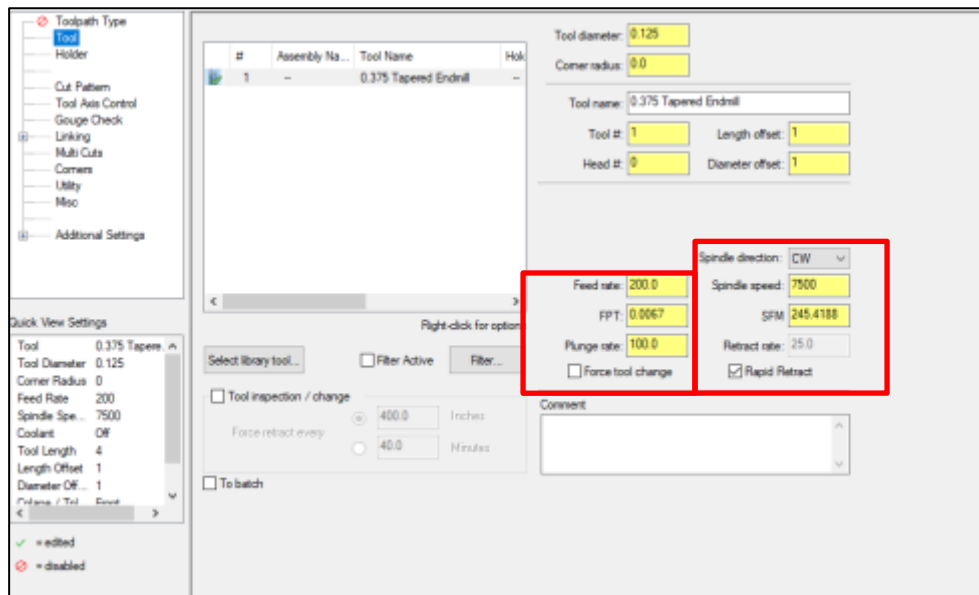


Fig. 3.11 Definiendo condiciones de corte para los álabes [fuente propia]

- En la sección de patrón de corte mostrada en la figura 3.12, agregamos un margen de material en la sección de swarf clearance y floor clearance, al agregarle un margen de material, dejaremos material para que podamos agregarle una operación de acabo superficial, y así mejorar la calidad de la pieza. La sección del swarf clearance se refiere al maquinado en la superficie de las paredes de los álabes. La sección del floor clearance se refiere al maquinado del piso y radios de las orillas de los álabes.
- En la siguiente opción se agrega el ángulo requerido para controlar el eje de la herramienta de corte, este eje es conocido como el ángulo de avance en las operaciones de maquinado 5 ejes, y solo se utiliza para maquinar superficies complejas que involucren 5 o hasta 6 ejes. En la figura 3.13 se muestra el ángulo seleccionado para el maquinado de los turbos (3° grados) en nuestro estudio, utilizando una herramienta de corte cónica de 1/8" de diámetro en la punta.

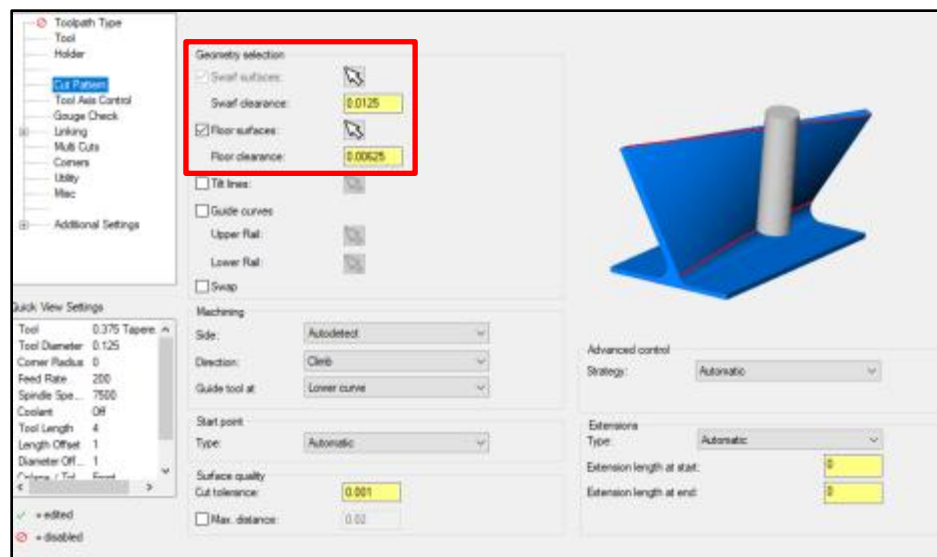


Fig. 3.12 Definiendo el patrón de corte de los álabes [fuente propia]

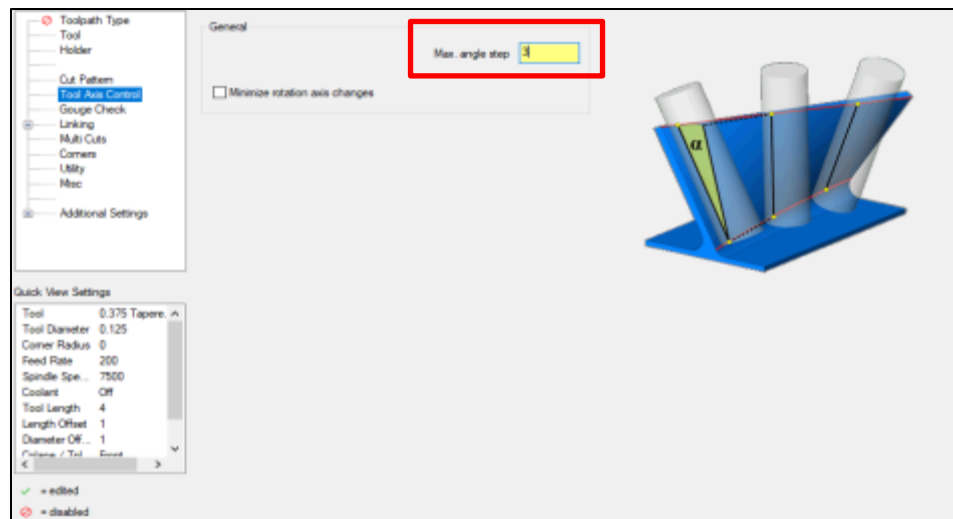


Fig. 3.13 Definiendo el control del eje de la herramienta [fuente propia]

- Por último, en la opción de Multicortes (Multi cuts) definimos el método de corte para todo el proceso de maquinado de los álabes, así como también el patrón de pasadas o capas que la herramienta de corte le dará a cada álabe en los 9 segmentos que contiene el turbo. En la figura 3.14 se



muestran los valores sugeridos para esta opción, cuyos valores fueron validados en la experimentación.

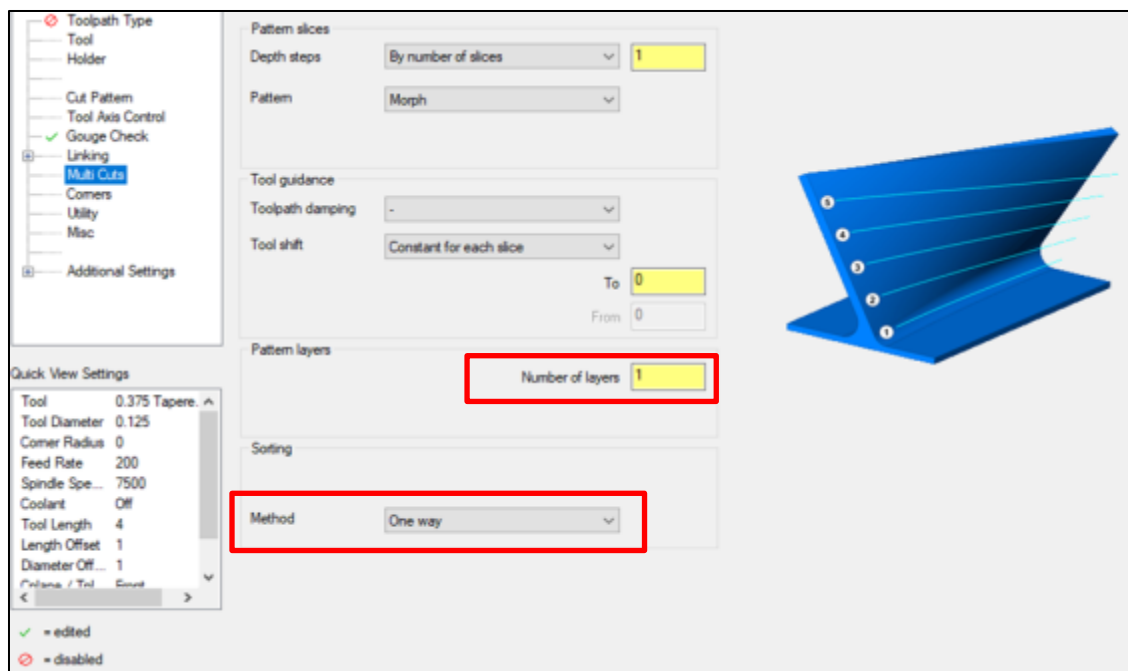


Fig. 3.14 Definiendo los multicortes de los álabes de la pieza [fuente propia]

3.2.3 Proceso de Acabado (Finish).

- Se agrega por último la cuarta operación de maquinado para definir el acabado o finish a nuestra pieza de trabajo. Para esto, se agrega una operación de la aplicación del fresado Swarf (swarf milling) igual que la mencionada arriba en la operación #3, solo que en esta ocasión, si cambiaremos los parámetros en la opción de las condiciones de corte de la pieza.

En la figura 3.15 se muestra los valores obtenidos en la experimentación para el maquinado de turbos, como podrán observar, el avance se reduce con el objetivo de que la herramienta de más pasadas al momento de estar removiendo material. La forma de obtener un mejor acabado es disminuir el



avance por pulgada y la profundidad de corte, y mantener o incluso incrementar la velocidad del husillo (revoluciones), esto incrementará un poco en el tiempo de ciclo, pero mejorará la calidad de la pieza notablemente, eliminando rebabas ocasionadas por el maquinado en los bordes o radios de los álabes, así como también, mejorara el acabado en la superficie del cuerpo del turbo.

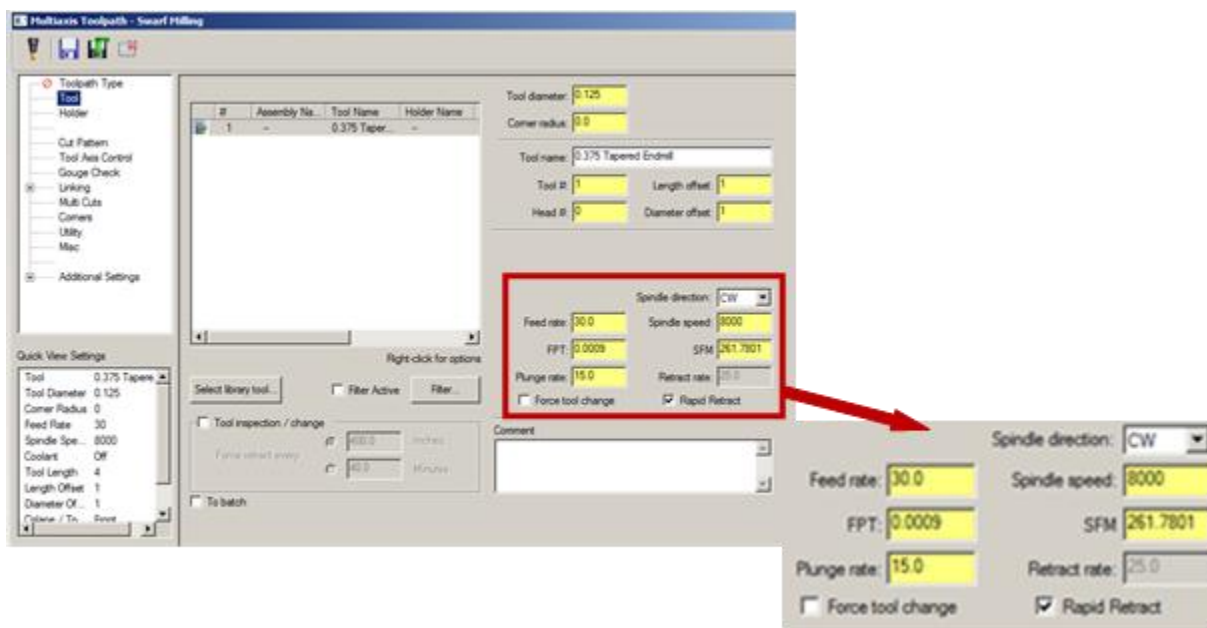


Fig. 3.15 Definiendo condiciones de corte para el acabado de la pieza de trabajo [fuente propia]

- Por último, se define el patrón de corte para el proceso de acabado en la pieza, como se muestra en la figura 3.16 en la sección de swarf clearance le agregamos el valor 0, esto quiere decir que removerá el exceso de material que le habíamos dejado en la tercera operación cuando se maquinaron los álabes, el resultado que se obtiene es la dimensión nominal en los espesores de los alabes definidos en el diseño del modelo 3D de la pieza. Esto también se repite para la superficie del piso (Hub) de la pieza, en la sección de floor clearance se puede ir disminuyendo la dimensión según el acabado deseado.

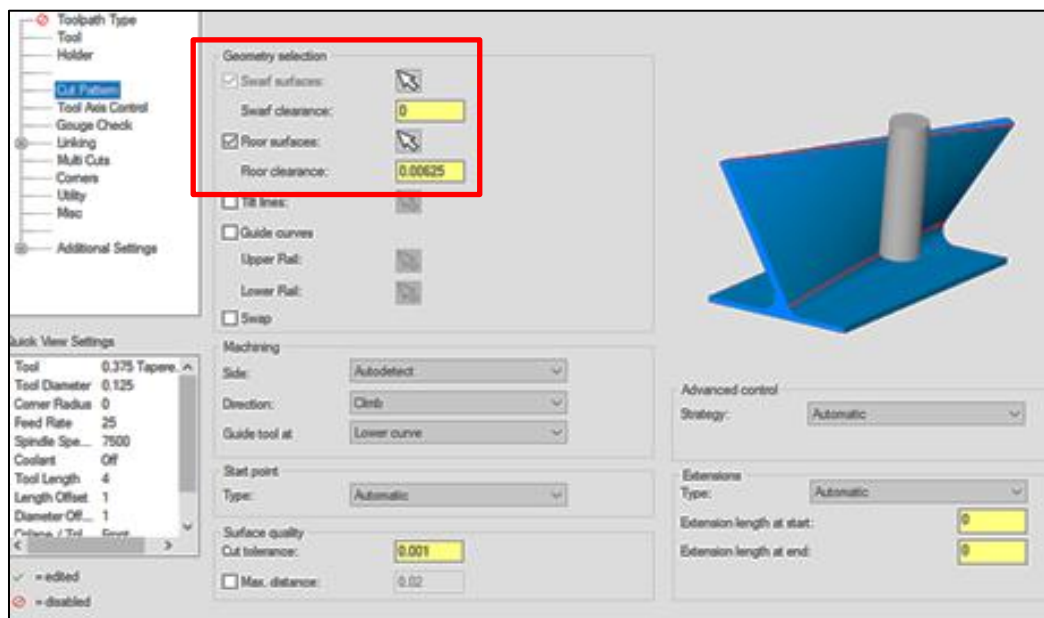


Fig. 3.16 Definiendo patrón de corte para el acabado de la pieza [fuente propia]

- Una vez terminada la ruta de maquinado para nuestra pieza, se procede a verificar las operaciones una por una, en el cuadro de grupo de trayectorias del maquinado. Como se muestra en la figura 3.17, seleccionamos la operación 1 y 2 para verificar el proceso de desbaste de la pieza, como se puede observar, estas 2 operaciones remueven el material y hacen una preforma en los alabes en una pasada por operación. Es un proceso de maquinado duro para después proceder con el formado de la pieza y por último el acabado.

Las líneas azules nos muestra como la herramienta de corte remueve material de la superficie del cuerpo de la pieza (Hub), así como también, realiza una preforma en los segmentos de los álabes.

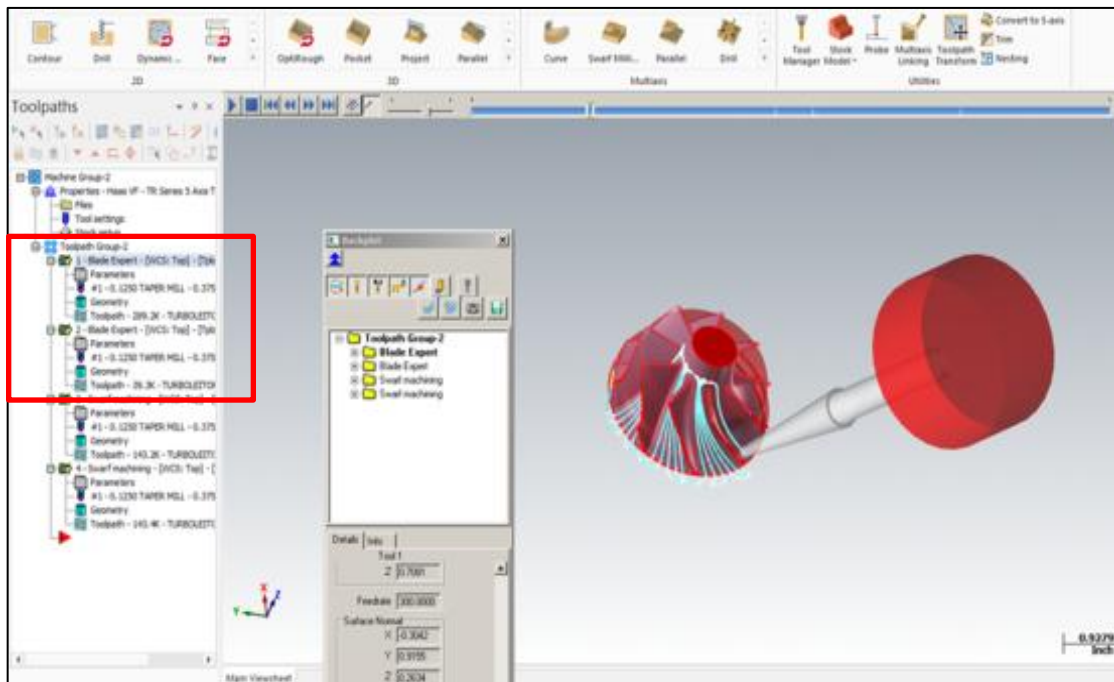


Fig. 3.17 Verificación de la ruta de maquinado del proceso de desbaste (blade expert) [fuente propia]

- Ahora verificamos las operaciones del fresado swarf para el formado de los álabes de la pieza. Las líneas azules en la figura 3.18, nos muestran como la herramienta de corte remueve material de la superficie de los álabes, así como también, maquina los radios de los bordes alrededor de cada álabe.
- Este mismo procedimiento se hace en la última operación de maquinado del fresado swarf agregada para el acabado, solo que el parámetro avance de corte y profundidad de corte se disminuyen, dejando las revoluciones del husillo igual o incrementando su velocidad, esto para lograr un acabado más fino en la superficie de la pieza de trabajo.

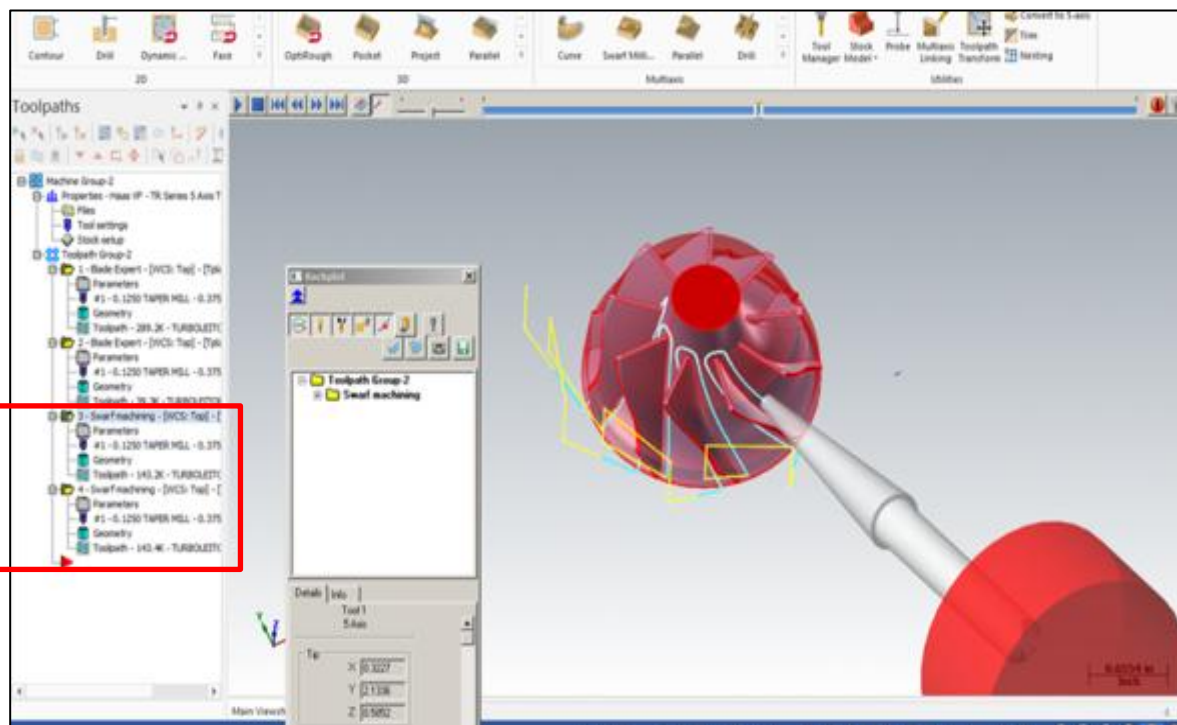


Fig. 3.18 Verificación de la ruta de maquinado del fresado swarf para los álabes [fuente propia]

- Una vez verificado las 4 operaciones de maquinado, se procede a generar el código G para ser cargado a la fresadora CNC 5 ejes. Se recomienda siempre simular el programa en el tablero de la CNC antes de arrancar el programa en la máquina, esto es para evitar algún accidente verificando que no habrá alguna colisión con la pieza de trabajo, herramienta de corte y verificar la altura entre cortador y pieza de trabajo.



3.3 Proceso de fabricación de preformas

Para iniciar con el proceso de fabricación en nuestro estudio en el maquinado de superficies complejas, tomamos el modelo de un turbo cuyo componente aplica para turbocargadores, turbinas de gas y compresores para la industria automotriz o aeroespacial. Una vez hecho el programa de maquinado para la máquina de 5 ejes, se carga y simula el programa.

Se cortan pedazos de la barra sólida de aluminio con la longitud deseada para la pieza de trabajo, para nuestro estudio las dimensiones de nuestras piezas son de 1.200" longitud por 2" de diámetro exterior. La figura 3.19 muestra cómo debe quedar las piezas antes de proceder al torneado de la preforma. El plano de esta pieza específica se muestra en la sección de Anexos.



Fig. 3.19 Pieza careada para fabricar preformas [fuente propia]

Una vez cortadas las piezas, se procede a torneear las preformas. Para esto se requiere diseñar un aditamento de montaje especial para montar nuestras piezas en las mordazas de un torno. Este aditamento nos permitirá atornillar nuestra pieza para evitar vibraciones, desalineamiento o que la pieza pueda aflojarse debido al maquinado a alta velocidad. En la figura 3.20 se muestra el aditamento de montaje utilizado para las piezas. El plano de este aditamento se muestra en la sección de Anexos.



Fig. 3.20 Aditamento de montaje para preparación de preformas para los turbos [fuente propia]

Una vez montada la pieza sobre el aditamento de montaje, es necesario verificar que la pieza este totalmente sujeta a nuestra base, se requiere que la pieza este alineada junto con la base del aditamento. La concentricidad de la pieza con la base del aditamento es muy importante antes de iniciar el maquinado. Una vez verificado esto, procedemos a maquinar la preforma. En la figura 3.21 se muestra la pieza sujeta a la base del aditamento de montaje.



Fig. 3.21 Pieza montada en el aditamento de montaje para fabricación de Preforma [fuente propia]



Este proceso se recomienda hacer en un torno CNC para mayor rapidez, precisión y si se busca hacerlo en producción en masa, se genera el programa y código G en el MasterCAM, después se carga en el torno CNC (El plano de la preforma se muestra en la sección de Anexos), solo se dibuja el perfil de la preforma en el MasterCAM y se genera las operaciones de maquinado como se ha explicado anteriormente, solo que para esta opción se utilizará la aplicación del proceso de torneado (Lathe).

En la figura 3.22, se muestra la preforma terminada, cabe mencionar que esta procedimiento se hace para facilitar el maquinado en la fresadora de 5 ejes, principalmente evitar desgaste en la herramienta de corte, alargando la vida útil de la herramienta, así como también, reducir el tiempo total del ciclo de maquinado de la pieza.

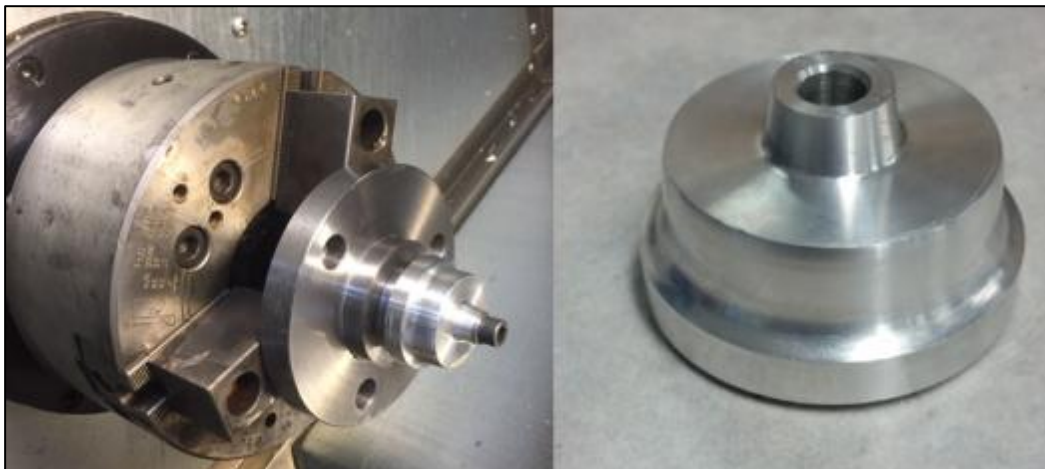


Fig. 3.22 Preforma terminada para maquinado de turbo [fuente propia]

Nota: Siempre simular el programa antes de correrlo para asegurarnos de que la ruta de maquinado esta correcta y no dañar la pieza o la herramienta de corte, provocando alguna colisión.



3.4 Proceso de fabricación de turbos o álabes

Una vez terminada la preforma como se explicó en el punto 3.3, se procede a preparar la pieza en el aditamento de montaje de la máquina CNC 5 ejes. Para esto se requiere diseñar un aditamento de montaje especial para la fresadora 5 ejes. En la figura 3.23, se muestra el aditamento utilizado en nuestro estudio (el plano del diseño de este aditamento se muestra en la sección de Anexos).



Fig.3.23 Aditamento de montaje para fabricar turbos [fuente propia]

El procedimiento de montaje será idéntico al de la preforma. Se sujeta la pieza en la base del aditamento de montaje, verificando su alineación y concentricidad. Se aprieta el tornillo con una llave, y se procede a obtener los cero de máquina y pieza en la fresa de 5 ejes, para conocer nuestra altura permitida que tendremos entre la herramienta de corte y nuestra pieza de trabajo.

Si la preparación de la máquina es hecha incorrectamente, esto podrá generar una colisión o accidente en la máquina, dañando la herramienta, así como también, la pieza de trabajo. En la figura 3.24, se muestra la pieza, herramienta de



corte ya montada en la fresadora de 5 ejes, con la preparación lista para iniciar el proceso de maquinado.



Fig. 3.24 Preforma montada en aditamento para iniciar maquinado de turbo [fuente propia]

Nota: Siempre simular el programa antes de correrlo para asegurarnos de que la ruta de maquinado esta correcta y no dañar la pieza o la herramienta de corte, provocando alguna colisión.



La temperatura es otro factor importante que tenemos que cuidar, se debe asegurar tener siempre este prendido la opción del refrigerante en la máquina. Se debe de ajustar la dirección y la presión del chorro de refrigerante para evitar problemas durante el maquinado de la pieza. Algunos problemas que pueden obtenerse son el calentamiento de la pieza durante el maquinado, desgaste de la herramienta de corte.

Una vez terminado el proceso de desbaste del material, inmediatamente hacemos el cambio de herramienta para iniciar el proceso de acabado. Este terminará de completar nuestra pieza, eliminando el material y dándole la forma adecuada al turbo. Este proceso se recomienda realizarse a una alta velocidad del husillo y con avance de corte bajo. En la figura 3.25 se muestra nuestra pieza terminada y preparada para ser inspeccionada en un instrumento de inspección dimensional.



Fig. 3.25 Pieza terminada (álabes del turbo)



3.5 Metrología de las piezas

Una vez terminada nuestra pieza, procedemos a la medición de los álabes del turbo para verificar que la pieza está fabricada correctamente. Se inspecciona los espesores de los álabes cuya variación debe de estar en una tolerancia de ± 0.002 " de acuerdo a nuestra investigación y estudio de capacidad realizado.

La siguiente variable a medir es la altura. Deben de estar en un mismo plano, para referenciar y poder medirlas, con una tolerancia en la distancia de la altura de ± 0.002 ". Para hacer la inspección dimensional de la altura y espesor de álabes, se utilizó un comparador óptico. En la figura 3.26 se muestra el comparador óptico utilizado para nuestro estudio.



Fig. 3.26 Comparador óptico Deltronic MPC-5 [fuente propia]



3.6 Materiales y Equipo

1. Barra sólida de aluminio de 2" Diámetro (aleación 6061) para fabricación de muestras.
2. Barra de acero solida D2 para fabricación de aditamentos de montaje 6" OD
3. End mill 3/8" OD Tapered 5 Deg. Angle per side, 1/8" Tip Dia. Material: HSS
4. Cono Portaherramientas TECKNIKS SYIC-22225-N RPM: 25000
5. Set de coils base 1" ID para montar material a maquinar.
6. Refrigerante soluble liquido en agua
7. Fresadora CNC 5 ejes HAAS VF1
8. 1 Tornillo sin fin de diámetro 5/16"- UNC
9. 1 Rondana 5/16" de diámetro
10. Aditamentos de montaje para maquinar preforma en torno CNC (ver anexos)
11. Aditamento de montaje para maquinar los álabes (turbos) en fresadora CNC 5 ejes (ver anexos)
12. Comparador óptico Deltronic DH-216-MPC-5 (*ver figura 3.25*)



Capítulo 4. Resultados.

4.1 Experimentación

Por medio de un diseño de experimentos factorial se consideran los factores velocidad de rotación del husillo en revoluciones/min (A) y avance de corte en pulgada/min (B); como variable de respuesta el tiempo de ciclo en minutos. Esto nos permite comprobar si los factores seleccionados son significativos. Para este experimento se realizaron 2 réplicas para cada combinación de tratamientos dando un total de 18 corridas que se ejecutaron de forma aleatoria. Se utilizó Aluminio 6061 para fabricación de las muestras, con una herramienta de corte de alta velocidad cónica (Endmill HSS).

Los parámetros utilizados en nuestro estudio fueron obtenidos mediante el método de prueba y error, con el objetivo de analizar el comportamiento de los ejes 4 y 5to de la fresadora multiejes y validar la ruta de maquinado preliminar. A continuación, se muestra la primer fase de nuestro experimento que se realizó con el objetivo de conocer los factores significativos en el proceso para la reducción del tiempo de ciclo del maquinado de los turbos, verificar los aditamentos de montaje y ver el porcentaje de error en el dimensionamiento de los álabes, así como también, generar la ruta de maquinado óptima en el programa MasterCAM.

La tabla 4.1 nos muestra los datos obtenidos en este experimento preliminar cuyos valores de velocidad de husillo y avance fueron determinados como punto de inicio para la experimentación. Para la profundidad de corte se definió usar el 50% del avance solamente, para evitar dañar la herramienta y alargar el tiempo de vida para todo el experimento. La respuesta final es el tiempo de ciclo, cuyos tiempos obtenidos son los siguientes:



Num. corrida	Velocidad husillo (Rpm)	SFM velocidad de corte (pies/min)	Avance (pulg/min)	Profundidad de corte (pulg/min)	tiempo ciclo (minutos)
1	5000	163,625	30	15	22,47
2	5000	163,625	40	20	21,23
3	5000	163,625	50	25	20,39
4	7000	229,075	30	15	22,47
5	7000	229,075	40	20	21,28
6	7000	229,075	50	25	20,34
7	6000	196,35	30	15	22,45
8	6000	196,35	40	20	21,26
9	6000	196,35	50	25	20,37
10	5000	163,625	30	15	22,54
11	5000	163,625	50	25	20,40
12	7000	229,075	30	15	22,43
13	7000	229,075	40	20	21,28
14	7000	229,075	50	25	20,35
15	6000	196,35	50	25	20,37
16	6000	196,35	40	20	21,27
17	6000	196,35	30	15	22,46
18	5000	163,625	40	20	21,26

Tabla 4.1 Resultados del diseño de experimentos factorial para tiempo de ciclo primera fase
[fuente propia]

Hipótesis a probar:

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3$$

$$H_1: \mu_i \neq \mu_j$$

Modelo estadístico:

$$Y_{ij} = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \varepsilon_{ij}$$



Utilizando el programa estadístico Minitab, se analizó el diseño de experimentos factorial obtenido en esta primera fase. La figura 4.1 muestra el análisis de varianza (ANOVA) obtenido para tiempo de respuesta (tiempo ciclo).

Modelo lineal general: TIEMPO CICLO vs. RPM; AVANCE

Factor	Tipo	Niveles	Valores
RPM	fijo	3	5000; 6000; 7000
AVANCE	fijo	3	30; 40; 50

Análisis de varianza para TIEMPO CICLO, utilizando SC ajustada para pruebas

Fuente	GL	SC sec.	SC ajust.	MC ajust.	F	P
RPM	2	0,0018	0,0018	0,0009	2,09	0,180
AVANCE	2	13,3282	13,3282	6,6641	15378,67	0,000
RPM*AVANCE	4	0,0056	0,0056	0,0014	3,24	0,066
Error	9	0,0039	0,0039	0,0004		
Total	17	13,3395				

S = 0,0208167 R-cuad. = 99,97% R-cuad.(ajustado) = 99,94%

Fig. 4.1 ANOVA para el diseño de experimentos factorial [fuente propia]

Como podemos observar en la tabla de ANOVA, el valor P de .000 para el factor Avance es menor que el nivel de significancia $\alpha = .05$, por lo que se rechaza la hipótesis para este factor, concluyendo que sí afecta a la variable de respuesta, es decir al tiempo de ciclo del maquinado.

Por otro lado, tanto el valor P de velocidad de rotación de 0.180, como el de la interacción entre los factores A y B de 0.066 son mayores que el nivel de significancia ($\alpha = .05$), por lo que no influyen en el tiempo de ciclo.



La figura 4.2 nos muestra la gráfica de probabilidad normal con la variable de respuesta del tiempo de ciclo, la cual solo 2 valores son atípicos y están fuera de rango de la mayor parte de los datos.

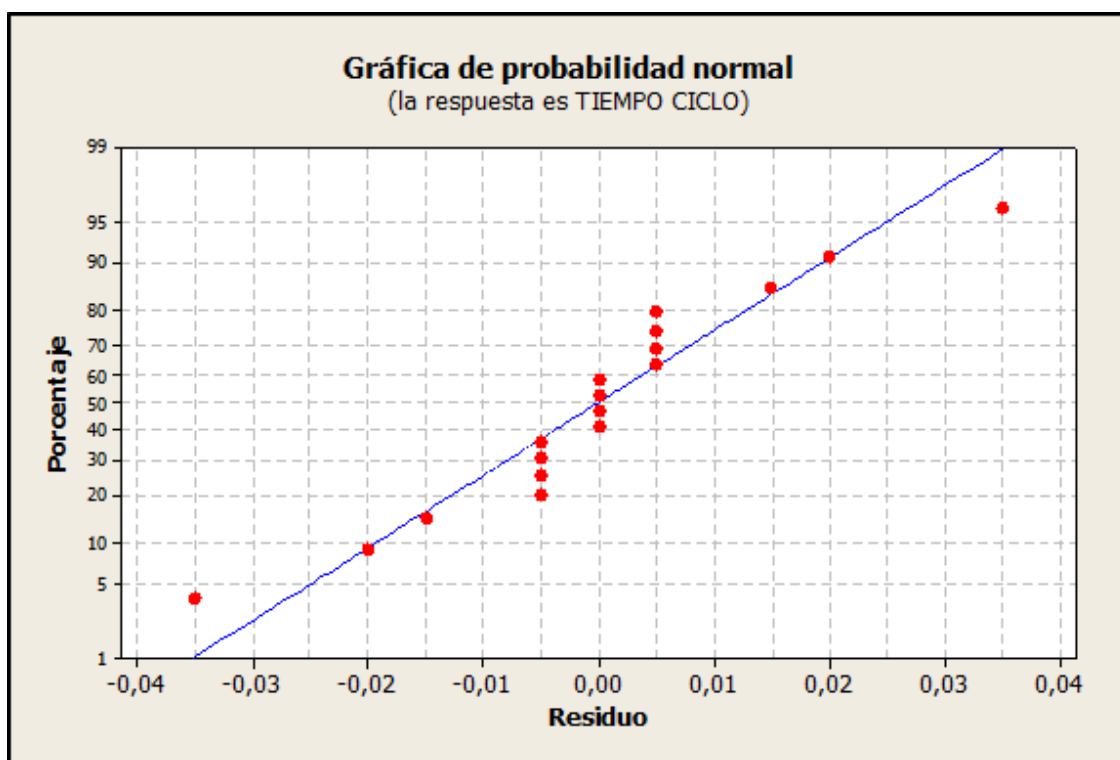


Fig. 4.2 Gráfica de probabilidad normal para respuesta tiempo ciclo [fuente propia]

Revisando los datos en forma individual se utilizó la gráfica de efectos principales que compara cada factor en forma individual con respecto a la Media en el tiempo de ciclo. Como podemos observar (figura 4.3) el eje del tiempo no varía significativamente ya que se mantiene en 21 minutos, el incrementar las RPM no impacta directamente en el tiempo, sino que, de acuerdo al estudio hecho en la experimentación, los RPM del husillo nos impactará en el acabado de nuestra pieza, esto es, entre más revoluciones se introduzcan al programa de maquinado mejor acabado obtendremos, esto puede variar según los estándares de calidad del acabado según el cliente.

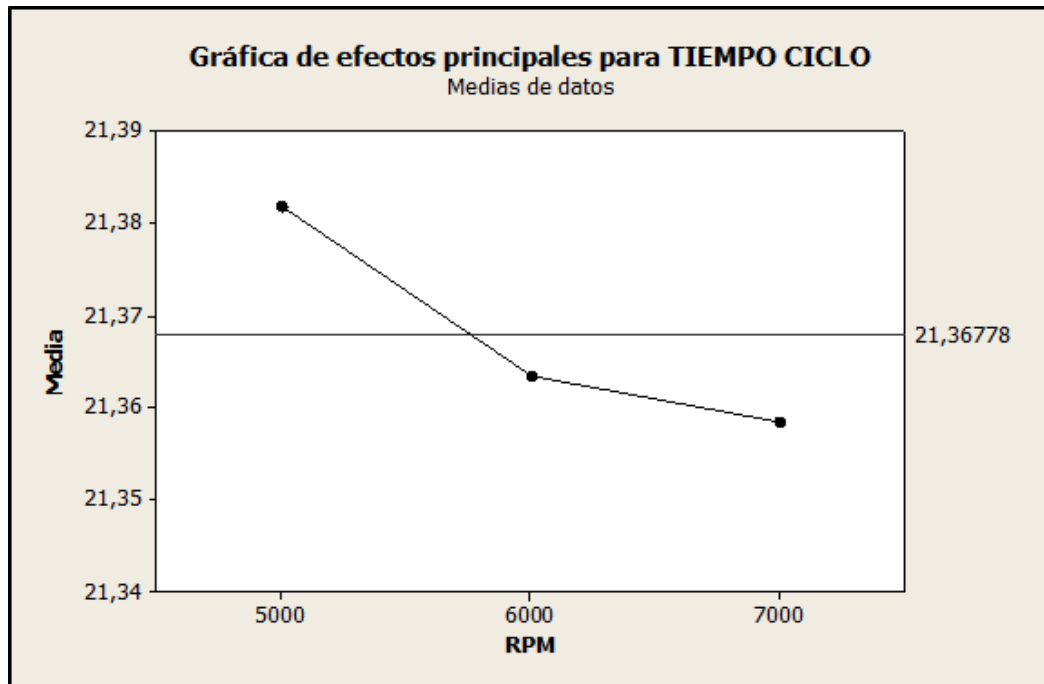


Fig. 4.3 Gráfica de efectos principales para el tiempo de ciclo RPM vs Media tiempo [fuente propia]

En la siguiente grafica individual podemos observar el avance de corte con respecto al tiempo de ciclo (figura 4.4), en donde el punto 30 a 22.47 minutos es el mayor tiempo obtenido en el estudio. Para el punto 50 tenemos un tiempo de 20.37 minutos, esto quiere decir, que entre más avance de corte introduzcamos a nuestro programa de maquinado, menor será el tiempo de maquinado. La variable significativa es el avance de corte.

Por último, se muestra la gráfica de interacción para tiempo de ciclo para cada factor (figura 4.5), en la cual se muestra la media de los datos para el tiempo, como se observa en esta primera fase, al incrementar el avance de corte, el tiempo de ciclo tiende a disminuir.

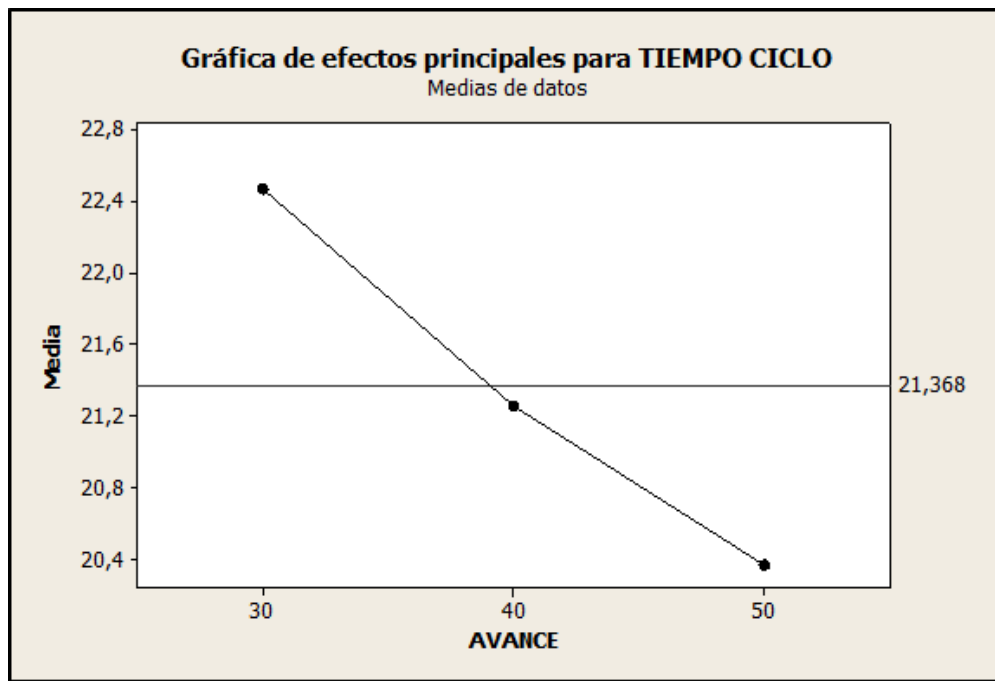


Fig. 4.4 Gráfica de efectos para el tiempo de ciclo Avance vs Media tiempo [fuente propia]

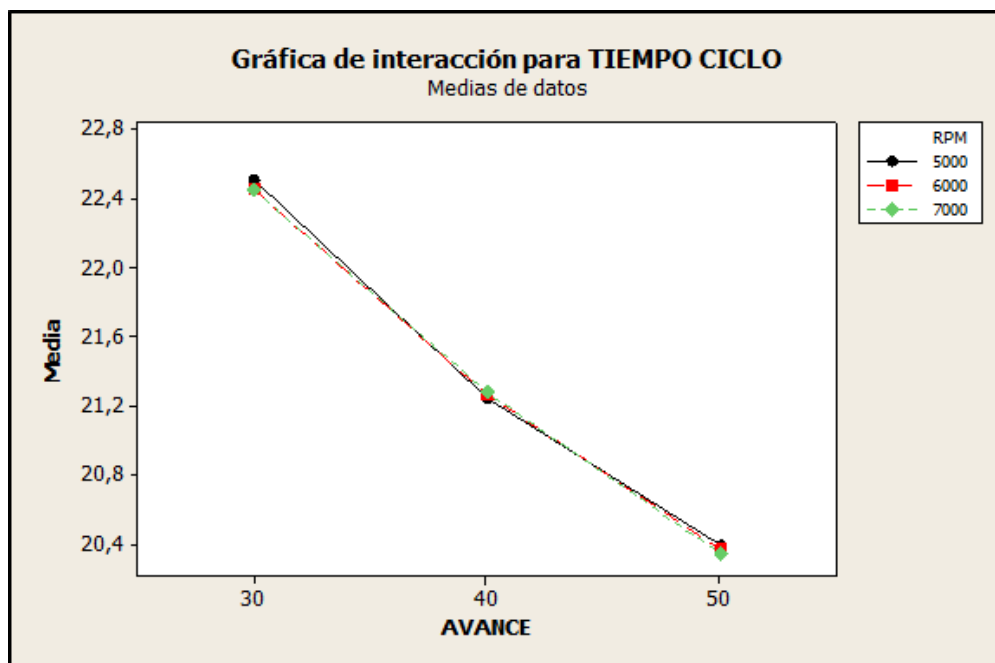


Fig. 4.5 Gráfica de interacción para tiempo ciclo primera fase [fuente propia]



Análisis en la manufactura de superficies complejas a través del diseño de experimentos



Una vez terminado esta primera fase del experimento, se procedió a realizar algunas mejoras y comprobar los resultados obtenidos, se realizó la segunda fase del experimento, el cual ya con los parámetros definidos, se incrementó el factor avance de corte, que de acuerdo a nuestro primer experimento, este factor es la variable significativa que afecta a nuestro proceso de maquinado.

Se prepararon muestras para maquinar en nuestra máquina de 5 ejes, se incrementó el avance de corte y la profundidad de corte. El otro factor que son las revoluciones por minuto del husillo no tuvo ningún cambio respecto al experimento inicial. A continuación, se muestra la tabla 4.2 con los parámetros finales y tiempos de ciclos obtenidos ya con los cambios realizados.

Velocidad husillo (Rpm)	SFM Velocidad de corte (pies/min)	Avance (pulg/min)	Profundidad de corte (pulg/min)	Tiempo ciclo (minutos)
6000	196,35	200	100	9,39
6000	196,35	300	150	9,18
6000	196,35	200	100	9,40
7000	229,08	100	50	10,00
5000	163,63	100	50	10,02
5000	163,63	100	50	10,02
5000	163,63	300	150	9,20
5000	163,63	200	100	9,44
7000	229,08	300	150	9,16
5000	163,63	300	150	9,22
7000	229,08	300	150	9,16
6000	196,35	100	50	10,00
7000	229,08	200	100	9,37
7000	229,08	200	100	9,37
6000	196,35	100	50	10,00
6000	196,35	300	150	9,18
5000	163,63	200	100	9,43
7000	229,08	100	50	9,58

Tabla 4.2 Resultados del diseño de experimentos factorial para tiempo de ciclo segunda fase
[fuente propia]



Modelo lineal general: tiempo ciclo vs. RPM; avance

Factor	Tipo	Niveles	Valores
RPM	fijo	3	5000; 6000; 7000
avance	fijo	3	100; 200; 300

Análisis de varianza para tiempo ciclo, utilizando SC ajustada para pruebas

Fuente	GL	SC sec.	SC ajust.	MC ajust.	F	P
RPM	2	0,04270	0,04270	0,02135	2,17	0,170
avance	2	1,80493	1,80493	0,90247	91,78	0,000
RPM*avance	4	0,02907	0,02907	0,00727	0,74	0,589
Error	9	0,08850	0,08850	0,00983		
Total	17	1,96520				

S = 0,0991632 R-cuad. = 95,50% R-cuad. (ajustado) = 91,49%

Fig. 4.6 ANOVA para el diseño de experimentos factorial segunda fase [fuente propia]

Como podemos observar en la tabla de ANOVA (figura 4.6), el valor P de .000 para el factor Avance es menor que el nivel de significancia $\alpha = .05$, por lo que se rechaza la hipótesis para este factor, comprobando que sí afecta a la variable de respuesta tiempo ciclo como se observó en el primer experimento.

Por otro lado, tanto el valor P de velocidad de rotación de 0.170, como el de la interacción entre los factores A y B de 0.589 son mayores que el nivel de significancia ($\alpha = .05$), por lo que no influyen en el tiempo de ciclo.

En la siguiente grafica individual podemos observar el avance de corte con respecto al tiempo de ciclo (figura 4.7), en donde en el punto 300 tenemos una media del tiempo de 9.16 minutos siendo el mínimo tiempo de ciclo obtenido en nuestro experimento, comprobando así que el factor avance de corte es la variable significativa.

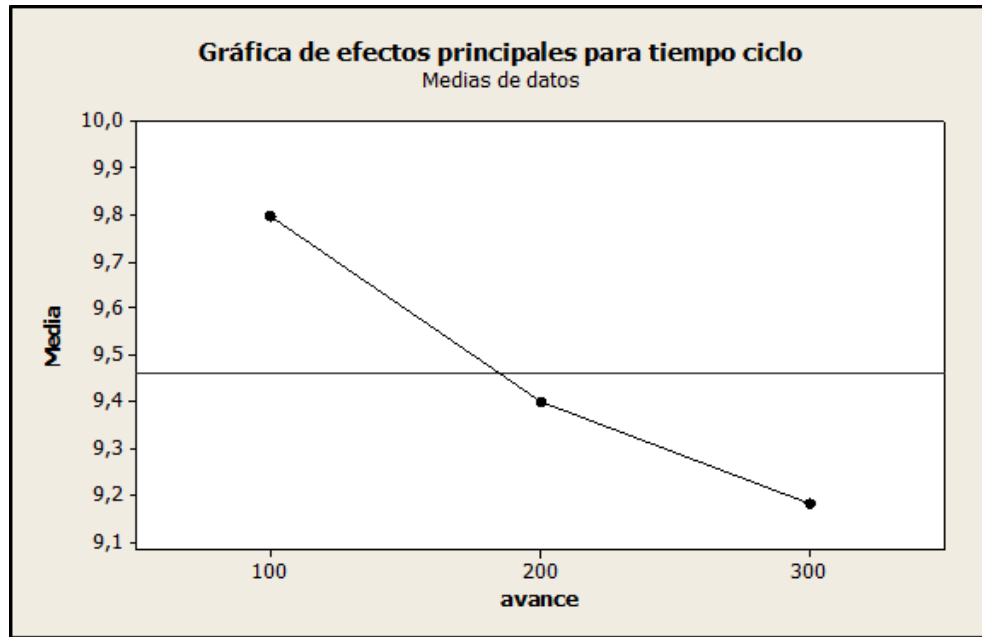


Fig. 4.7 Gráfica de efectos para el tiempo de ciclo Avance vs Media tiempo segunda fase [fuente propia]

La grafica individual de efectos principales para las Rpm (figura 4.8), podemos observar que la media del tiempo de ciclo no varía significativamente al incrementar el giro del husillo, se mantiene en los 9 minutos, como se había observado anteriormente, este factor nos impacta en el acabado de la pieza, pero no en el tiempo de ciclo de maquinado.

Por último, la gráfica de interacción para tiempo de ciclo para cada factor (figura 4.9), en la cual en esta segunda fase, se muestra la media de los datos para el tiempo, como se observó en esta primera fase, al incrementar el avance el tiempo de ciclo tiende a disminuir.

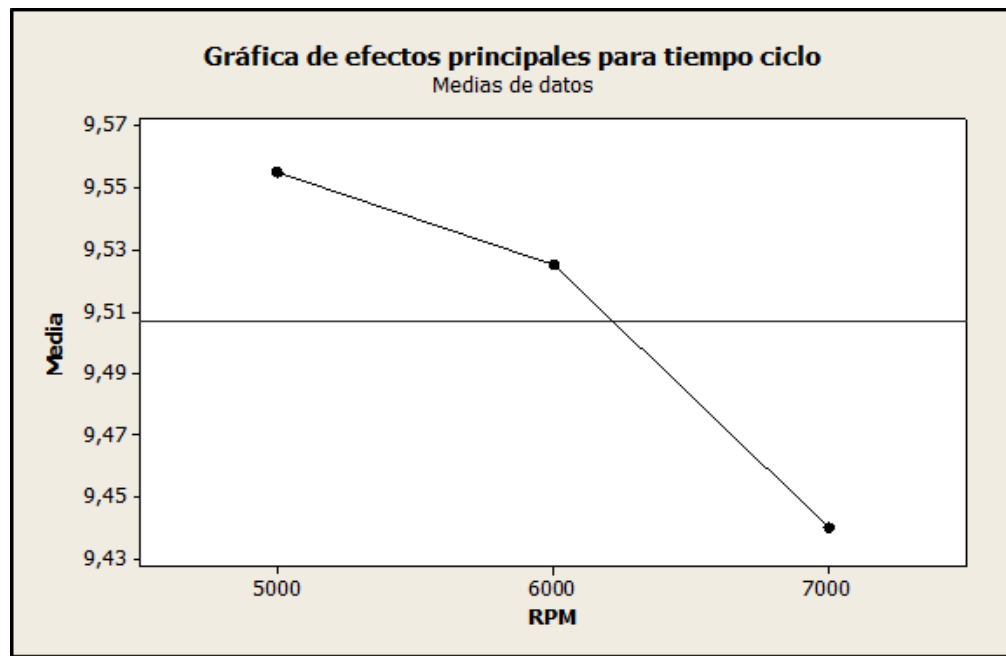


Fig. 4.8 Gráfica de efectos para el tiempo de ciclo Rpm vs Media tiempo segunda fase [fuente propia]

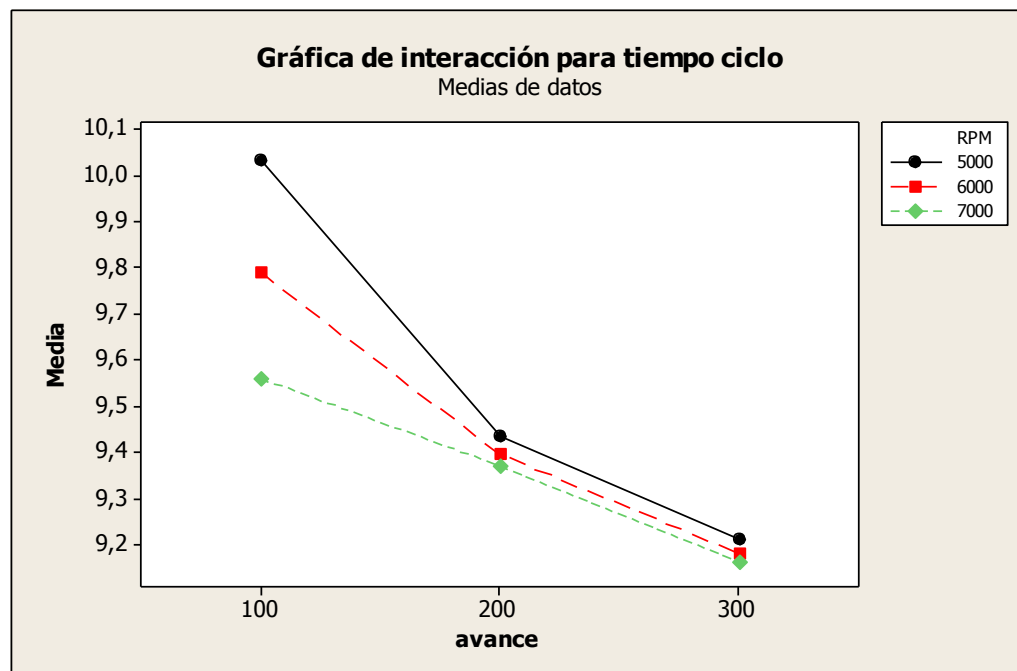


Fig. 4.9 Gráfica de interacción para tiempo de ciclo segunda fase [fuente propia]



Análisis en la manufactura de superficies complejas a través del diseño de experimentos



Como resultado final en nuestro diseño de experimentos, se obtuvieron los parámetros óptimos para la reducción del tiempo de maquinado. La mejor combinación obtenida para el tiempo de maquinado, mostrada en la tabla 4.2, fue: velocidad de giro del husillo de 7000 rpm, velocidad de corte de 229.08 pies/min, con un avance de corte de 300 pulg/min y profundidad de corte de 150 pulg/min. Con dicha combinación obtuvimos el menor tiempo de ciclo posible con las condiciones actuales en nuestra máquina de control numérico de 5 ejes como se muestra en la figura 4.10

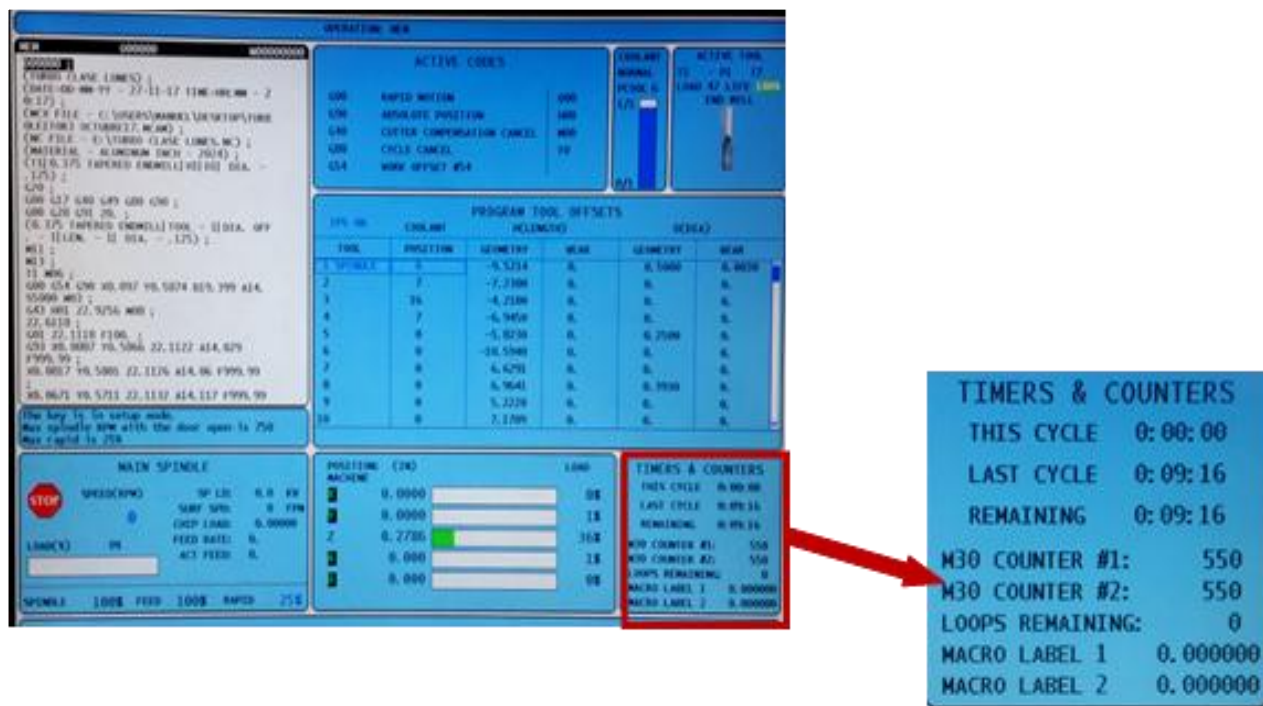


Fig. 4.10 Pantalla de operación de maquina CNC de 5 ejes [fuente propia]



4.2 Medición de las piezas

Para verificar el resultado de nuestro estudio, se procedió a medir las piezas fabricadas durante el experimento. Para la inspección de las piezas se utilizó un comparador óptico mencionado en el capítulo 3, el cual se tomaron de referencia los espesores de los álabes y las alturas de estas mismas.

Se midieron los álabes de cada pieza fabricada en la experimentación, así como también la altura. En la figura 4.11, se muestra como se midieron las piezas en el comparador óptico.

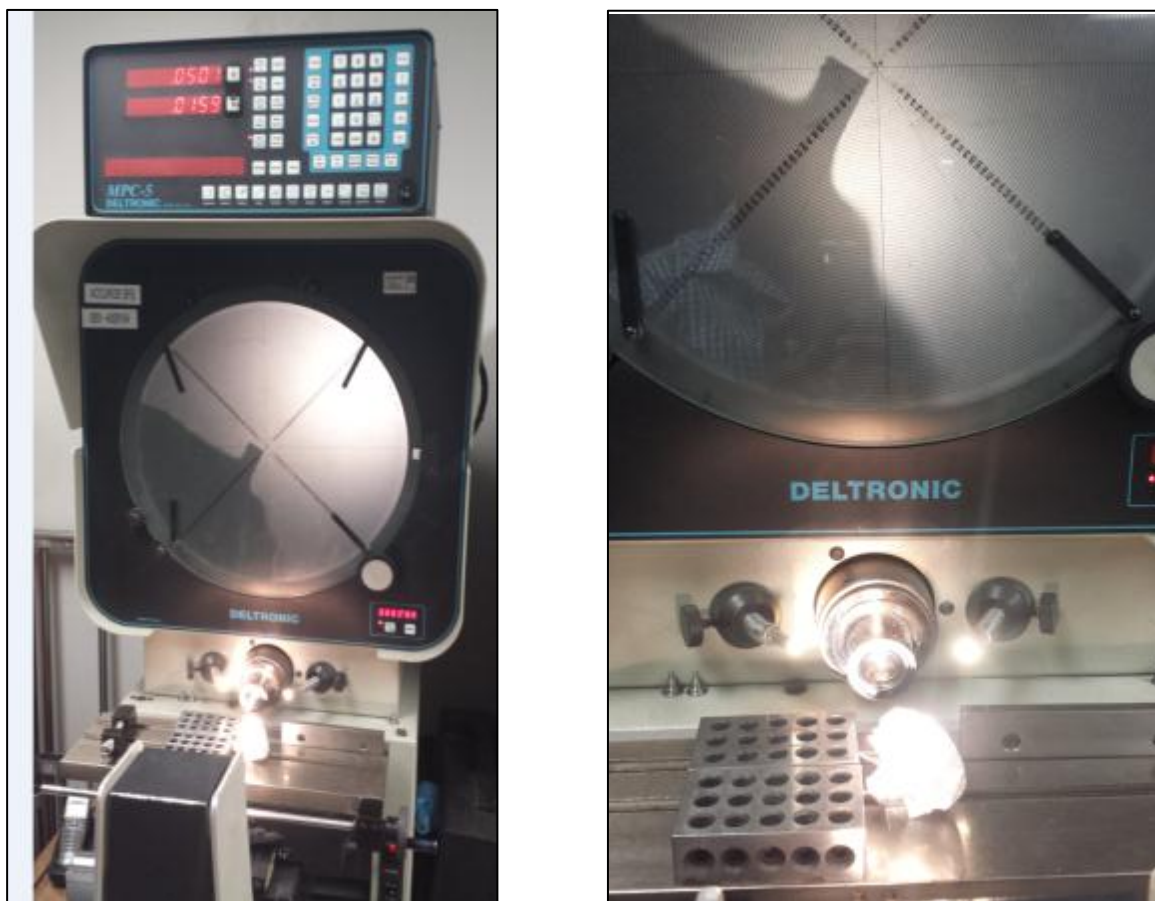


Fig. 4.11 Inspección de espesores de las piezas utilizando comparador óptico [fuente propia]



El resultado de la medición del espesor de álabe de una pieza se muestra en la figura 4.12, como se observa en la pantalla del comparador en el plano X marcado en amarillo. Las mediciones se hicieron a través de los 9 álabes que compone la pieza, con una tolerancia de $\pm .002$ ".



Fig. 4.12 Pantalla del comparador óptico mostrando dimensión del espesor [fuente propia]

En la figura 4.13 se muestra las mediciones para las alturas de los álabes de las piezas. El resultado de la medición de las alturas de cada álabe de una muestra, se muestra en la figura 4.14, como se observa en la pantalla del comparador en el plano Y marcado en amarillo.



Fig. 4.13 Inspección de alturas de las piezas utilizando comparador óptico [fuente propia]



Fig. 4.14 Pantalla del comparador óptico mostrando dimensión de altura [fuente propia]



Análisis en la manufactura de superficies complejas a través del diseño de experimentos



Estos resultados se muestran en la tabla 4.3, en donde podemos observar que tanto espesores como alturas, están dentro del rango de tolerancia, la variación es mínima quedando dentro de la tolerancia permitida.

Espesor de álabes		Avance (feed rate) pulgada/minuto																	
		100	100	100	100	100	100	200	200	200	200	200	200	300	300	300	300	300	300
		Revoluciones/minuto Rpm																	
		5000	5000	6000	6000	7000	7000	5000	5000	6000	6000	7000	7000	5000	5000	6000	6000	7000	7000
Replica (n)		1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
# álabes		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1		0,0501	0,0501	0,0500	0,0501	0,0500	0,0501	0,0500	0,0501	0,0500	0,0501	0,0501	0,0500	0,0501	0,0500	0,0501	0,0500	0,0501	0,0501
2		0,0501	0,0503	0,0495	0,0503	0,0495	0,0503	0,0495	0,0503	0,0495	0,0501	0,0503	0,0495	0,0503	0,0495	0,0503	0,0495	0,0501	0,0503
3		0,0485	0,0485	0,0485	0,0485	0,0485	0,0485	0,0485	0,0485	0,0485	0,0485	0,0485	0,0485	0,0485	0,0485	0,0485	0,0485	0,0485	0,0485
4		0,0485	0,0490	0,0485	0,0490	0,0485	0,0490	0,0485	0,0490	0,0485	0,0485	0,0490	0,0485	0,0490	0,0485	0,0490	0,0485	0,0485	0,0490
5		0,0490	0,0492	0,0490	0,0492	0,0490	0,0492	0,0490	0,0492	0,0490	0,0490	0,0492	0,0490	0,0492	0,0490	0,0492	0,0490	0,0490	0,0492
6		0,0492	0,0506	0,0495	0,0506	0,0495	0,0506	0,0495	0,0506	0,0495	0,0492	0,0506	0,0495	0,0506	0,0495	0,0506	0,0495	0,0492	0,0506
7		0,0485	0,0501	0,0485	0,0501	0,0485	0,0501	0,0485	0,0501	0,0485	0,0485	0,0501	0,0485	0,0501	0,0485	0,0501	0,0485	0,0485	0,0501
8		0,0486	0,0506	0,0486	0,0506	0,0486	0,0506	0,0486	0,0506	0,0486	0,0486	0,0506	0,0486	0,0506	0,0486	0,0506	0,0486	0,0486	0,0506
9		0,0500	0,0495	0,0501	0,0495	0,0501	0,0495	0,0501	0,0495	0,0501	0,0500	0,0495	0,0501	0,0495	0,0501	0,0495	0,0501	0,0500	0,0495

Altura de álabes		Avance (feed rate) pulgada/minuto																	
		100	100	100	100	100	100	200	200	200	200	200	200	300	300	300	300	300	300
		Revoluciones/minuto Rpm																	
		5000	5000	6000	6000	7000	7000	5000	5000	6000	6000	7000	7000	5000	5000	6000	6000	7000	7000
# Replica		1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
# álabes		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1		0,8020	0,8020	0,8015	0,8020	0,8020	0,8020	0,8015	0,8020	0,8020	0,8020	0,8020	0,8015	0,8020	0,8015	0,8020	0,8020	0,8020	0,8020
2		0,8015	0,8015	0,8025	0,8020	0,8015	0,8015	0,8025	0,8030	0,8025	0,8015	0,8015	0,8025	0,8020	0,8015	0,8015	0,8015	0,8030	0,8025
3		0,8015	0,8015	0,8020	0,8025	0,8015	0,8015	0,8020	0,8015	0,8015	0,8015	0,8015	0,8020	0,8025	0,8015	0,8015	0,8015	0,8015	0,8015
4		0,8015	0,8025	0,8010	0,8020	0,8015	0,8025	0,8010	0,8015	0,8025	0,8015	0,8025	0,8020	0,8030	0,8020	0,8015	0,8025	0,8015	0,8025
5		0,8020	0,8020	0,8025	0,8015	0,8020	0,8020	0,8025	0,8020	0,8020	0,8010	0,8015	0,8025	0,8010	0,8020	0,8020	0,8020	0,8020	0,8020
6		0,8020	0,8020	0,8010	0,8010	0,8020	0,8020	0,8010	0,8030	0,8025	0,8020	0,8010	0,8010	0,8015	0,8010	0,8020	0,8020	0,8030	0,8025
7		0,8020	0,8020	0,8020	0,8015	0,8020	0,8020	0,8020	0,8020	0,8020	0,8020	0,8015	0,8030	0,8015	0,8020	0,8020	0,8020	0,8020	0,8020
8		0,8015	0,8015	0,8020	0,8020	0,8015	0,8015	0,8020	0,8015	0,8020	0,8015	0,8020	0,8020	0,8020	0,8020	0,8015	0,8015	0,8015	0,8020
9		0,8015	0,8015	0,8015	0,8020	0,8015	0,8015	0,8015	0,8020	0,8015	0,8020	0,8015	0,8025	0,8015	0,8015	0,8015	0,8015	0,8020	0,8015

Tabla 4.3 Resultados del DOE mediciones de espesores y alturas de los álabes a través del comparador óptico [fuente propia]



Conclusiones.

El presente trabajo de tesis presenta un estudio profundo de cómo realizar maquinados en superficies complejas, debido a la dificultad y falta de información en la industria y talleres de maquinados. El estudio se enfocó en la manufactura de turbos o álabes para turbocompresores.

Se realizó un estudio por medio de la metodología del diseño de experimentos para obtener los valores óptimos de maquinado para manufacturar este tipo de superficies complejas. Para lograr un mejor entendimiento del tema, se investigó sobre turbinas de gas y turbocompresores, funcionamiento y aplicaciones en la industria. Esto se realizó con el fin de que el lector tenga un panorama general de aplicación tanto de las turbinas de gas como de los turbocompresores y pueda observar los campos de aplicación y la importancia que hoy en día tiene este tema en la industria.

Se logró definir una ruta de maquinado para la fabricación de un turbo para industria automotriz, con un modelo ya existente. Se realizaron pruebas en la máquina 5 ejes para poder verificar parámetros de maquinado y validar la ruta de maquinado.

Se realizaron muestras seleccionadas al azar para poder verificar tiempo de ciclo y proceder a optimizar el proceso de maquinado mediante la herramienta del diseño de experimentos, la cual nos proporcionó los factores y variables significativos para nuestro proceso de maquinado. Se comprobó a través del análisis de los resultados del diseño de experimentos cuáles variables afectan directamente al tiempo de ciclo. Dichas variables son el avance de corte y profundidad de corte. La combinación de tratamientos o niveles de cada factor que



optimizan el tiempo de ciclo son: avance a 300 pulg/min, profundidad de corte de 150 pulg/min y velocidad de giro de 7000 rpm. También una velocidad de corte de 229.08 pies/min con un tiempo de ciclo de maquinado de 9.16 minutos. Con dicha combinación obtuvimos el menor tiempo de ciclo posible con las condiciones actuales en nuestra máquina de control numérico de 5 ejes.

En relación a la hipótesis planteada al inicio de esta tesis, se demuestra que es correcta, pues se disminuye el tiempo de maquinado en los turbos en un 59% al utilizar los parámetros óptimos obtenidos durante el diseño de experimentos.

Se utilizaron aditamentos de montajes diseñados para evitar vibraciones en el proceso de maquinado debido a las altas velocidades de giro de la herramienta. Durante la experimentación se elaboraron piezas sin aditamentos dando como resultado piezas dañadas por desfase en el maquinado debido a vibraciones. El uso de aditamentos eliminó por completo las vibraciones. También se logró reducir la variación dimensional al momento de inspeccionar las piezas en el comparador óptico, como se mostró en la sección 4.3 (Medición de las piezas), teniendo como resultado piezas con una variación dimensional de ± 0.002 milésimas de pulgada, la cual es aceptable.

Se utilizaron herramientas convencionales de bajo costo para el estudio en donde se pudo comprobar que es posible realizar este tipo de piezas tan complejas sin tener las herramientas personalizadas especiales que la industria utiliza para este tipo de superficies complejas, de las cuales no hay mucha información en el mercado ni en bibliografías.

Esta tesis será de gran utilidad para los interesados en la fabricación de este tipo de piezas complejas (como talleres de maquinados, industria automotriz, aeroespacial) como punto de partida al utilizar parámetros definidos que fueron



Análisis en la manufactura de superficies complejas a través del diseño de experimentos



obtenidos en el estudio realizado en este proyecto, que cuenten con gran variedad de herramientas convencionales óptimas para la fabricación de material como el aluminio y titanio, así como también, con máquinas CNC de 5 ejes.

Poco a poco, los motores turbo (automotriz) comienzan a abarrotar los mercados a nivel mundial. En Europa este tipo de motores prácticamente dominan el mercado, pero en nuestro país aún se piensa que turbo es sinónimo de deportividad, y sí, en muchos casos lo es, pero en otros es sinónimo de ahorro sin perder en respuesta del acelerador, debido a esto, cada vez es más frecuente las marcas en México que contienen motores turbo. La demanda de este tipo de piezas complejas ha incrementado considerablemente durante los últimos 10 años, haciendo aún más importante el estudio de estos procesos ya que son pocas las industrias que se dedican a la fabricación en masa de álabes, debido a su complejidad, los talleres de maquinado no aceptan este tipo de proyectos por no tener el conocimiento de cómo fabricar estas piezas, por la precisión y el alto costo que resulta manufacturar estas piezas.



Recomendaciones.

La experimentación de nuestro estudio fue realizada bajo condiciones específicas para velocidad de avance de corte y velocidad de giro del husillo utilizando aluminio 6061 como material de trabajo.

Para el proceso de maquinado de desbaste de material se recomienda utilizar herramientas de corte cuadradas cónicas (Endmill) de alta velocidad (HSS) o de preferencia de carburo, con diámetro en la punta de 1/8" (0.1250") con un ángulo de 5° por lado, con 3 dientes tipo espiral, esto solamente si se utiliza aluminio como material de trabajo. En la sección de Anexos se muestra la hoja técnica para la herramienta recomendada para maquinar superficies complejas.

Para realizar el proceso de acabado o finish, se recomienda usar herramientas de bola cónicas de carburo. En la sección de Anexos se muestra la hoja técnica para la herramienta recomendada para hacer acabados a superficies complejas.

Para nuestro estudio se utilizó aluminio como material de trabajo, ya que es un material fácil de maquinar y se realiza a altas velocidades. Sus propiedades mecánicas lo hace ideal para este tipo de piezas complejas. Cabe mencionar, que en la industria automotriz y aeroespacial, los turbos para las turbinas de gas, compresores centrífugos y turbocargadores, son fabricados de aluminio. Para la turbina en los turbocompresores, el material a utilizar es titanio debido a las altas temperaturas que es sometido el turbo o álabes por los aires de escape.

Durante los procesos de maquinado es muy común que se presenten vibraciones en la máquina (chatter) lo cual puede perjudicar el acabado superficial a nuestras piezas, rotura de herramienta y desgaste en el husillo. Para esto se recomienda no usar cortadores con longitud de corte larga (sugerido de 3/4"-1 1/4"),



Análisis en la manufactura de superficies complejas a través del diseño de experimentos



usar profundidades bajas (usar 50% de profundidad de corte respecto al avance), utilizar aditamentos de sujeción para altas velocidades. Si las vibraciones o chatter se presentan, debemos disminuir la velocidad de giro del husillo o aumentar la velocidad de avance de corte.

Para el maquinado de titanio se recomienda utilizar herramientas de corte de bola o cuadrados de Carburo con recubrimiento TiAlN (Nitruro de titanio aluminio), de 3 dientes espirales. Esto es debido a que el titanio tiene una resistencia mecánica más alta que el aluminio y es más duro. Al utilizar este tipo de herramientas con recubrimiento nos permite aumentar la velocidad de corte y avance. Se sugiere hacer el mismo experimento que se realizó en esta tesis para utilizar titanio como material de trabajo y evaluar las condiciones de maquinado sugeridas en este documento, ya que por las propiedades del material y la herramienta con recubrimiento, estos valores podrían cambiar, se recomiendan utilizarse como punto de inicio para un estudio futuro.



Referencias.

- [1] Rolls Royce. The Jet Engine. Ed Rolls Royce plc. 1996, 292p
- [2] <http://www.cicloscombinados.com/index.php/turbinas-de-gas/las-turbinas-de-gas>
- [3] Treager I. E. Aircraft Gas Turbine Engine Technology. Ed. McGraw Hill, 1989, 549p
- [4] Cengel Y.A., Boles M.A. Termodinámica Ed. McGraw Hill, 4ta. Ed. 2003, 829p.
- [5] Wark K, Richards D.E., Termodinámica. Ed. McGraw Hill, 6ta Ed. 2003. 1048p
- [6] Mataix, Turbo Máquinas Térmicas, Ed. Limusa, Mexico 1990, 380p.
- [7] Klaus Hünecke, Jet Engines - Fundamentals of Theory, Design and Operations, ISBN 0-7603-0459-9, 1997, 256pp.
- [8] <https://aviation.stackexchange.com/questions/15510/what-provides-the-greatest-thrust-in-a-high-bypass-turbofan-engine>
- [9] Giampaolo,Anthony J. The gas turbine Handbook: Principle and practices.The Fairmount Press,Inc. 1997 368p
- [10] Boyce,Meherwan P. Gas Turbine Eng. Handbook. Gulf Publishing Company.1995 603p.



- [11] <http://www.atmosferis.com/tipos-de-camara-de-combustion-en-turbinas-de-gas/> Publicación Septiembre 2011
- [12] A. H. Lefebvre y D. R. Ballal, Gas Turbine Combustion. 3rd. ed., CRC Press, ISBN: 13: 987-1-4200-8605-8, 2010, 538p.
- [13] <https://www.motorpasion.com/tecnologia/sobrealimentacion-de-motores-turbocompresores> Revista Digital Motorpasion Semptiembre 2017
- [14] <http://motorgiga.com/periodistamotor> Sistemas de retroalimentación, Revista electromecánica, 2007
- [15] Revista Digital Autofácil Diciembre 2013.
. <http://www.autofacil.es/tecnologia/2013/02/12/historia-turbocompresor>.
- [16] <https://revistamotor.eu/index.php/de-calle/mecanica/555-motores-turbo-vs-motores-atmosfericos>
- [17] <https://www.mecanicoautomotriz.org/1256-manual-motores-sobrealimentados-turbocompresor-funcionamiento>. Manual de motores sobrealimentados.
- [18] Procesos de Manufactura, versión SI, de B. H. Amstead. P Ostwald y M. Begeman. Editorial Continental,
- [19] Fundamentos de Manufactura Moderna de Mikell P. Groover. Editorial Prentice Hall.
- [20] ASM metal handbook, Machining Vol. 3, 1967, 8va Ed.



[21] Fundamentals of CNC Machining, Culley, Ron (1988). Fitting and machining. Melbourne, Victoria: RMIT Publications. ISBN 0-7241-3819-6

[22] Valentovic, E.; Peterka, J.; Pokorný, P. The machining of the most complicated shapes. // MATAR Praha 2004

[23] X. XUN Integrating Advanced Computer-Aided Design, Manufacturing, and Numerical Control: Principles and Implementations (2009), IGI Global, Hershey

[24] 26th Edition Machinery's Handbook, Erik Oberg, Franklin D. Jones, Holbrook L. Horton and Henry H. Ryffel. Ed. Industrial Press INC. New York. 2000 ISBN 0-8311-2625-6

[25] Smid, Peter (2008), CNC Programming Handbook, 3rd ed., Industrial Press Inc.

[26] Ciencia de los materiales, Ed. Thompson, Askeland, Donald y Phule, Pradeep., 2004.

[27] Fundamentos de Manufactura Moderna de Mikell P. Groover. Editorial Prentice Hall.

[28] Machining data book 3rd ed, Vol.I and II. Metal cut Research Associates, Inc.

[29] <https://reliabilityweb.com/sp/articles/entry/los-lubricantes/>

[30] Procesos básicos de manufactura de H.C Kazanas, Thomas Gregor, Ed. McGraw Hill,



ANEXOS



ALUMINIO 6061 T6

Redondo, Cuadrado, Solera y Placa

Aleación Dúctil y Ligera, con gran resistencia y excelentes características de acabado, el aluminio **6061-T6** es ideal para la elaboración de piezas maquinadas con calidad de excelencia y para trabajos que requieran buen acabado superficial. Posee excelente resistencia a la corrosión y acabado además de facilidad de soldadura y una resistencia parecida a la del acero.

Ventajas:

Adicionalmente a sus características naturales (excelente conductividad, ligereza, nula toxicidad y que no produce chispa), el aluminio 6061-T6 ofrece las siguientes ventajas:

- Resistencia superior a la de las aleaciones 6063
- Elaborado mediante tratamiento térmicos
- Envejecido artificialmente
- Óptima conformación con el frío
- Excelentes características para soldadura fuerte y al arco.

Beneficios:

Siempre que se necesite un producto verdaderamente confiable contiene pensar en **aluminio 6061-T6**, que por su calidad garantiza los siguientes beneficios excelente resistencia a la corrosión, gran resistencia a la tensión excelente maquinabilidad



Aluminio 6061

El aluminio 6061 es una aleación de aluminio endurecido que contiene como principales elementos aluminio, magnesio y silicio. Originalmente denominado "aleación 61S" fue desarrollada en 1935. Tiene buenas propiedades mecánicas y para su uso en soldaduras. Es una de las aleaciones de aluminio más comunes para uso general. Se emplea comúnmente en formas pre templadas como el 6061-O y las templadas como el 6061-T6 y 6061-T651.

Usos

Es usado en todo el mundo para los moldes de inyección y soplado, construcción de estructuras de aeronaves, como las alas y el fuselaje de aviones comerciales y de uso militar; en refacciones industriales, en la construcción de yates, incluidos pequeñas embarcaciones, en piezas de automóviles, en la manufactura de latas de aluminio para el empaquetado de comida y bebidas. Es fácil de maquinari y resistente a la corrosión.

Composición Química

La proporción de aluminio debe oscilar entre el 95.85 y el 98.56 por ciento, mientras que el resto de elementos de la aleación atiende a los márgenes establecidos en la siguiente tabla, sin que existan otros elementos (distintos a los señalados en la tabla) en proporciones superiores a 0.05 de forma individual ni el 0.15 % en total:

Dureza brinell: 65

Elemento	Mínimo(%)	Máximo(%)
Silicio	0.4	0.8
Hierro	0	0.7
Cobre	0.15	0.4
Manganeso	0	0.15
Magnesio	0.8	1.2
Cromo	0.04	0.35
Zinc	0	0.25
Titanio	0	0.15

Propiedades Tecnológicas

Proceso	Clasificación
Soldabilidad	A
Electrón Beam	B
Gas Inerte	B
Por resistencia	B
Brazing	B
Maquinabilidad (T6)	C
Corte de viruta	A
Brillo de Sup. mecanizada	A
Resistencia a la Corrosión	A
Agentes atmosféricos	B
Ambiente marino	B
Anodizado	A
Protección	C
Brillante	A
Duro	A

Presentaciones

Densidad [gr/cm3]	Coef. De dilatación (0 a 100oC) [oC-1 x 106]	Angulo
2.7	23.6	Canal
Rango de fusión [oC]	Conductividad Térmica (0 a 100 oC) [W/m oC]	Cuadrado
575-650	Temple T6: 167	Lámina
Modulo de elasticidad [MPa]	Resistividad a 20 oC [uOm]	Placa
69500	Temple T6: 4.0	Redondo
Coeficiente de Poisson	Calor específico (0 a 100 oC)	Solera
0.33	940	Tubular Redondo, Rectangular y Cuadrado

Nota: Aunque nos hemos esforzado por asegurar la exactitud de los datos provistos, **Aluminios y Metales Unicornio** no garantiza ni acepta ninguna responsabilidad por la exactitud de los mismos.

Clasificación: (A)Muy buena - (B)Buena - (C)Aceptable - (D)Pobre o No Recomendado



Comparador Óptico Deltronic DH-216-MPC-5

tel: 800.451.6922
fax: 800.969.3358

DELTRONIC
www.deltronic.com

Thread and Plug Gages
Hi-Precision Grinding
Custom Parts Manufacturing

SPECIFICATIONS

Standard Features DH216

1. Fully usable 16" (405mm) viewing screen with edge-to-edge accuracy of 0.05%, 17.5" (445mm) glass screen
2. 10" X axis (254mm) and 6" Y axis (152mm) stage travel
3. Heat-treated nickel plated stage surface
4. Screen-locking mechanism
5. Digital Electronic Screen Protractor (ESP) with INC/ABS switchable displays 1" or .01"
6. Quick-change bayonet Lens Mount, no calibration needed
7. Vertical screen for easy viewing
8. Rotating Chart Clip System mounted on screen
9. Quick-release X axis clutch for rapid stage movement, with infinite fine adjustment
10. Erect Image
11. $\pm 15^\circ$ Helix stage, 5" readout increment
12. Telecentric Lens System
13. 150 watt Profile Illumination System with hi / low intensities

Screen
17.5" (445mm) diameter glass screen
60° and 90° crossed lines
1" or 0.01" digital display

Magnification Lenses
10x, 20x, 25x, 31.25x, 50x, 100x

Magnification Accuracy
 $\pm 0.05\%$ contour
 $\pm 0.10\%$ surface

Profile Illumination
Tungsten-Halogen bulb, 24 Volt, 150 Watt
Blower cooled

Surface Illumination
Tungsten-Halogen bulb, 24 Volt, 250 Watt
Fiber-Optic Delivery
Blower cooled

Work Stage
Standard
Travel: X-axis 10" (254mm) and Y-axis 5" (127mm)
Surface: Electroless Nickel Plated Steel, 18" (381mm) by 5" (127mm) with two dovetails
Focus travel 2.3" (58mm)
Option 1. Extended 12" X-axis travel
Travel: X-axis 12" (304mm) and Y-axis 5" (127mm)
Surface: Electroless Nickel Plated Steel, 18" (457mm) by 5" (127mm) with two dovetails
Option 2. Extended 18" X-axis travel
Travel: X-axis 18" (457mm) and Y-axis 5" (127mm)
Surface: Hard Anodized Aluminum, 23" (584mm) by 5" (127mm) with two dovetails
Option 3. Motorized X&Y Axis with Joystick
Option 4. Motorized Focus Axis
Option 5. Automated Measurement System - AMS

Lens Specification

- True Telecentric Design - total image stability.
- Magnesium fluoride coated for high performance lens transmission and contrast.
- Spherical aberration correction.
- Optional green filter is recommended for all magnifications other than 100x.

	10x	20x	25x	31.25x	50x	100x
Field of View (largest diameter on screen)	1.60" 40.64mm	.80" 20.32mm	.64" 16.26mm	.512" 12.95mm	.32" 8.13mm	.16" 4.06mm
Working clearance lens to work piece	3.15" 80.00mm	3.23" 82.04mm	2.75" 69.85mm	2.20" 56.88mm	2.00" 50.80mm	1.69" 42.93mm

Electrical
115/230 Volts ~
60/60 Hz (24 Volts to all lamps)

Machine Weight
Net approximately 300 pounds,
shipping weight approximately 450
pounds. CE Approved



Cortador cuadrado cónico de 1/8" diámetro de 3 dientes, Aceros rápidos (HSS)

- Cortador cuadrado cónico recomendado para realizar desbastes en piezas con superficies complejas. Excelente para aleaciones de aluminio
- Cortador de aceros rápidos proporciona buena resistencia al desgaste y usados para el maquinado en máquinas de 5 ejes, para fresados laterales.

Made in USA - 5° Taper Angle per Side, 1/8" Tip Diam, 1-1/4" Length of Cut, High Speed Steel 3
Flute Tapered Square End Mill

Uncoated, 3-1/8" Overall Length, 3/8" Shank Diam, Spiral Flute, Centercutting



Specs

Taper Angle Per Side	5.00
Small End Diameter (Inch)	1/8
Small End Diameter (Decimal Inch)	0.1250
Material	High Speed Steel
End Type	Square End
Finish/Coating	Uncoated
Length of Cut (Inch)	1-1/4
Length of Cut (Decimal Inch)	1.2500
Number of Flutes	3
Shank Diameter (Inch)	3/8
Overall Length (Inch)	3-1/8
Flute Type	Spiral
Flute Direction	Right Hand
Centercutting	Yes



Cortador de bola cónico de 1/8" diámetro de 3 dientes, Carburo

- Cortador de bola cónico recomendado para realizar superficies de acabados en aleaciones de aluminio. Mayor rigidez que los aceros rápidos y altamente resistentes a altas temperaturas producidas en el mecanizado.

Accupro - 5° Taper Angle per Side, 1/8" Tip Diam, 1-1/4" Length of Cut, Solid Carbide 3 Flute
Tapered Ball End Mill

3" Overall Length, 3/8" Shank Diam, Centercutting



Specs

Taper Angle Per Side	5.00
Small End Diameter (Inch)	1/8
Small End Diameter (Decimal Inch)	0.1250
Material	Solid Carbide
End Type	Ball End
Length of Cut (Inch)	1-1/4
Length of Cut (Decimal Inch)	1.2500
Number of Flutes	3
Shank Diameter (Inch)	3/8
Overall Length (Inch)	3
Nose Radius (Inch)	1/16
Centercutting	Yes

