



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE IMPELLER PARA UN
TURBOCOMPRESOR TIPO CORE CARTRIDGE PARA CHEVROLET LUV 2.2/2.5
APLICANDO TECNOLOGIA CAD-CAM-CAE”**

Trabajo de titulación

Tipo: Proyecto Técnico

Presentado para optar el grado académico de:

INGENIERO MECÁNICO

AUTORES: CRISTIAN GEOVANNY ACOSTA ROMERO

DARÍO MARCELO CARRILLO DOMÍNGUEZ

DIRECTOR: Ing. MIGUEL ANGEL ESCOBAR GUACHAMBALA

Riobamba – Ecuador

2021

© 2021, Cristian Geovanny Acosta Romero; & Darío Marcelo Carrillo Domínguez

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho del Autor.

Nosotros, Geovanny Cristian Acosta Romero y Darío Marcelo Carrillo Domínguez, declaramos que el presente trabajo de titulación es de nuestra autoría y que los resultados del mismo son auténticos y originales. Los textos del documento que provienen de otra fuente están debidamente citados y referenciados.

Como autores, asumimos la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este Trabajo de Titulación. El patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 10 de marzo de 2021



Cristian Geovanny Acosta Romero

220013113-0



Darío Marcelo Carrillo Domínguez

180439479-7

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

El Tribunal del Trabajo de Titulación certifica que: El trabajo de titulación; tipo: Proyecto Técnico, **DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE IMPELLER PARA UN TURBOCOMPRESOR TIPO CORE CARTRIDGE PARA CHEVROLET LUV 2.2/2.5 APLICANDO TECNOLOGÍA CAD-CAM-CAE**, realizado por los señores: **CRISTIAN GEOVANNY ACOSTA ROMERO** y **DARÍO MARCELO CARRILLO DOMÍNGUEZ**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del Trabajo de Titulación, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal Autoriza su presentación.

	FIRMA	FECHA
Ing. Edwin Fernando Viteri Núñez	_____	2021-04-05
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL		
Ing. Miguel Ángel Escobar Guachambala	_____	2021-04-05
DIRECTOR DE TRABAJO DE TITULACIÓN		
Ing. Sócrates Miguel Aquino Arroba	_____	2021-04-05
MIEMBRO DEL TRIBUNAL		

DEDICATORIA

El presente trabajo de titulación se lo dedico en primer lugar a Dios por brindarme salud y fortaleza a lo largo de este arduo camino, a mis padres Luis y Mercedes por ser mis pilares quienes me brindaron apoyo incondicional para poder afrontar momentos difíciles que se han presentado en la vida, a mis hermanos Luis y Francisco por sus consejos para que me fortalezca al largo de mis estudios, a mis sobrinos quienes por medio de sus sonrisas hacían olvidar momentos difíciles.

A mis tíos, primos y amigos los que estaban con sus palabras de aliento y fortaleciendo de no rendirse y seguir adelante.

Cristian

El presente trabajo de titulación se lo dedico en primer lugar a Dios que me ha llenado de fortaleza a lo largo de este arduo camino, a mis padres Mirian y Fernando pues me han brindado el apoyo para afrontar todas las adversidades que nos ha presentado la vida y me han sabido dar soporte en momentos de flaqueza, a mi hermano Edison por siempre aconsejarme y guiarme a lo largo de mis estudios y mi vida personal.

A mis primos, tíos y amigos los que con su apoyo incondicional me han sabido levantarme de los momentos difíciles que se nos presenta en la vida.

Darío

AGRADECIMIENTO

Agradezco a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo por abrirme las puertas y formar partes de esta distinguida institución y formarme como estudiantes de su prestigiosa carrera de Ingeniería Mecánica, a la vez quiero agradecer a mis docentes quienes compartieron sus conocimientos con el fin de formarme y posterior seguir preparándome para afrontar los retos que se presenten en la vida profesional.

Cristian

Agradezco a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo por haberme permitido ser parte de su distinguida institución y forjarme como estudiante de la prestigiosa carrera de Ingeniería Mecánica, a la vez quiero agradecer tanto a la Escuela de Mecánica como a los docentes que a lo largo de esta vida estudiantil han sabido guiarme y compartir sus conocimientos con el fin de formarme por el camino del bien tanto como persona, así como un futuro profesional.

Darío

TABLA DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	xi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xii
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xii
RESUMEN.....	xvi
SUMMARY.....	xvii
INTRODUCCIÓN.....	1

CAPÍTULO I

1. DIAGNÓSTICO DEL PROBLEMA.....	3
1.1 Antecedentes.....	3
1.2 Formulación del Problema.....	4
1.3 Justificación.....	4
1.3.1 <i>Justificación Teórica</i>	4
1.3.2 <i>Justificación Metodológica</i>	5
1.3.3 <i>Justificación Práctica</i>	5
1.4 Alcance.....	6
1.5 Objetivos.....	6
1.5.1 <i>Objetivo general</i>	6
1.5.2 <i>Objetivos específicos</i>	6

CAPÍTULO II

2	FUNDAMENTOS TEORICOS.....	7
2.1	Turbocompresor.....	7
2.2	Tipos de turbocompresores.	7
2.2.1	<i>Turbocompresor de geometría fija.</i>	8
2.2.2	<i>Turbocompresor de geometría Variable.....</i>	8
2.3	Clasificación de los turbocompresores.....	8
2.4	Rendimiento de los turbocompresores.....	9
2.5	Número específico de revoluciones de los Turbocompresores radiales y axiales.....	9
2.6	Turbocompresor centrífugo	10
2.6.1	<i>Funcionamiento de un turbocompresor centrífugo</i>	12
2.7	Rodete	12
2.7.1	<i>Tipos de rodetes</i>	13
2.8	Sistema inductor.....	16
2.9	Sistema difusor	18
2.10	Relación de compresión máxima en una etapa de un Turbocompresor centrífugo	19
2.11	Impulsor.....	19
2.12	Triángulos vectoriales	22
2.13	Rendimiento del impulsor	24
2.14	Factor de Deslizamiento.....	25
2.14.1	<i>Usos industriales del Control numérico computarizado (CNC)</i>	29
2.14.2	<i>Tipos de máquinas CNC según su número de ejes.....</i>	29
2.14.3	<i>Código G.....</i>	34

CAPÍTULO III

3	MARCO METODOLÓGICO	37
3.1	Datos de la máquina	37
3.2	Lenguaje ISO	40
3.3	Sistema de coordenadas	41
3.4	Funciones específicas de la CNC 5 ejes	42
3.4.1	<i>Traori</i>	42
3.4.2	<i>Trafoof</i>	43
3.5	Simulación antes de mecanizar	43
3.6	Diseño del álabe del impulsor mediante Software CAD especializado	43
3.6.1	<i>Toma de medidas del impeller</i>	43
3.6.2	<i>Cálculos de parámetros del turbocompresor</i>	45
3.6.3	<i>Flujo másico</i>	45
3.6.4	<i>Propiedades del álabe</i>	49
3.6.5	<i>Determinación de los ángulos de los álabes en el borde anterior y posterior</i>	50
3.6.6	<i>Líneas medias de los álabes principales</i>	51
3.6.7	<i>Espesor del álabe</i>	55
3.6.8	<i>Extensión CFD</i>	56
3.7	Simulación CAE	59
3.7.1	<i>Generación de la geometría</i>	59
3.7.2	<i>Bladegen</i>	59
3.7.3	<i>Modificar las curvas spline del impeller</i>	62
3.7.4	<i>Mallado de un turbo compresor</i>	65
3.7.5	<i>Mallado con Turbo Mesh</i>	65
3.7.6	<i>Topología</i>	65
3.7.7	<i>Mesh Data</i>	66

3.7.8	<i>3D Mesh</i>	67
3.8	Manufactura del impeller CAM	69
3.8.1	<i>Selección del material</i>	69
3.8.2	<i>Montaje del centro de mecanizado</i>	70
3.8.3	<i>Definición de geometría de trabajo</i>	70
3.8.4	<i>Funciones de programación NX específicas del proceso para el mecanizado del impeller</i>	74
3.8.5	<i>Desbaste del cubo</i>	75
3.8.6	<i>Desbaste de cuchillas múltiples</i>	75
3.8.7	<i>Acabado con redondeo</i>	76
3.8.8	<i>Acabado de los álabes primarios y separadores</i>	78
3.8.9	<i>Acabado del cubo</i>	81
3.8.10	<i>Acabado con redondeo</i>	83
3.9	Generación de matriz polar “Transformar”	85
3.9.1	<i>Selección de herramientas de trabajo</i>	88
3.10	Impresión en 3D	90
3.10.1	<i>Materiales utilizados para la impresión 3D</i>	90
3.10.2	<i>Ventajas y desventajas</i>	91
3.11	Costos	91

CAPÍTULO IV

4.1	Análisis y resultados	94
4.1.1	<i>Análisis de velocidad</i>	94
4.1.2	<i>Análisis de temperatura</i>	95
4.1.3	<i>Análisis de presión</i>	95
4.1.4	<i>Análisis de la eficiencia del impeller</i>	97

4.2 G- CODE	98
CONCLUSIONES	102
RECOMENDACIONES	104
GLOSARIO	
BIBLIOGRAFÍA	
ANEXOS	

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-3:	Especificaciones técnicas de la máquina	38
Tabla 2-3:	Dimensiones del impeller core cartridge para Chevrolet LUV 2.2/2.5	44
Tabla 3-3:	Datos de trabajo y aerodinámica del impeller	59
Tabla 4-3:	Costos directos	91
Tabla 5-3:	Costos indirectos	92
Tabla 6-3:	Costos totales	93
Tabla 1-4:	Resultados de simulación	98

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-2.	Corte meridional de un turbo compresor a) Radial; b) Diagonal; c) Axial.....	8
Figura 2-2.	Curvas características de un turbocompresor: a) radial; b) axial, con curvas límites de bombeo.....	9
Figura 3-2.	Vista seccional de un compresor centrífugo.....	11
Figura 4-2.	Rodete de entrada y salida radial.	13
Figura 5-2:	Rodetes; a) Abierto; b) semiabierto; c) Semiabierto de doble aspiración; d) Cerrado de doble aspiración; e) Cerrado de simple aspiración.	14
Figura 6-2:	Rodetes semiabiertos; a) Curvados hacia atrás; b) Curvados hacia delante; c) de salida Radial	15
Figura 7-2:	Rodete de turbocompresor con álabes de salida radial, curvados a la entrada, del tipo semiabierto.....	16
Figura 8-2:	Turbocompresor centrífugo con álabes del rodete curvados a la entrada y salida real.....	16
Figura 9-2:	Inductor de un compresor centrífugo.....	17
Figura 10-2:	Impulsor de cara abierta con cuchillas separadoras.	17
Figura 11-2:	Diagrama de Mollier para la etapa completa del compresor centrífugo.	18
Figura 12-2:	Los dos mayores planos en un impulsor centrífugo.....	20
Figura 13-2:	Triángulos vectoriales de flujo de entrada y salida del impulsor	23
Figura 14-2:	Diagrama que muestra las hojas curvadas hacia adelante, hacia atrás y hacia delante	23
Figura 15-2:	Geometría de paso del impulsor	25
Figura 16-2:	Geometría del alabe del impulsor	25
Figura 17-2:	Diagramas de velocidad reales e hipotéticos a la salida de un impulsor con álabes barridos hacia atrás.....	26
Figura 18-2:	(a)Remolino relativo sin flujo continuo (b) Flujo relativo a la salida del impulsor	27
Figura 19-2:	Modelo de flujo para el factor de deslizamiento Stodola.....	27
Figura 20-2:	Espiral logarítmica. El ángulo β^{\wedge} del alabe es constante para todos los radios .	28
Figura 21-2:	Factores de corrección del cabezal para impulsores centrífugos	29
Figura 23-2:	Configuración típica de un torno CNC de bancada inclinada de dos ejes - tipo trasero.....	30
Figura 24-2:	Configuración típica de un torno CNC con dos torretas.	31

Figura 25-2:	Notación de los ejes y dirección de movimiento de máquinas herramientas.....	34
Figura 26-2:	Estructura de un programa CNC.....	35
Figura 1-3:	Máquina ROMI DCM 620 5X.....	40
Figura 2-3:	Sistemas de EJES B y C	41
Figura 3-3:	Mecanizado CNC de 5 ejes mediante TRAORI.....	42
Figura 4-3:	Impeller core cartridge para Chevrolet LUV 2.2/2.5	44
Figura 5-3:	Vista superior del Impeller core cartridge para Chevrolet LUV 2.2/2.5	45
Figura 6-3:	Calores específicos de gases ideales.	47
Figura 7-3:	Configuración global del impeller.	48
Figura 8-3:	Dimensiones principales del impeller.	49
Figura 9-3:	Propiedades del álabe.	50
Figura 10-3:	Configuración de propiedades de los álabes; número de álabes y sus ángulos ..	51
Figura 11-3:	Modelo de diseño de los álabes para un conformado de mapeo.....	52
Figura 12-3:	Mapeo conforme de la geometría del álabe principal y secundario.	53
Figura 13-3:	Modelo de diseño de los álabes; ángulo de progresión del álabe.	53
Figura 14-3:	Ángulo de progresión del álabe principal y secundario.	54
Figura 15-3:	Modelado 3D de los álabes del impeller.	54
Figura 16-3:	Espesor de los álabes del impeller.	55
Figura 17-3:	Espesor y longitud de los álabes principal y secundario.	56
Figura 18-3:	Extensión CFD de los álabes del impeller.	57
Figura 19-3:	Ajustes de modelado para los álabes del impeller.....	57
Figura 20-3:	Acabado paramétrico del modelado de los álabes del impeller.....	58
Figura 21-3:	Vista 3D de los álabes principales y secundarios del impeller.	58
Figura 22-3:	Datos de trabajo DesignModeler	60
Figura 23-3:	Propiedades del gas ideal aire Design Modeler	61
Figura 24-3:	Configuración de geometría del impeller Design Modeler	61
Figura 25-3:	Resultados paramétricos del impeller Design Modeler.....	62
Figura 26-3:	Configuración de curvas spline del impeller.....	63
Figura 27-3:	Ángulos de entrada y salida del Impeller β y θ	64
Figura 28-3:	Visualización en modelado 3D del impeller	65
Figura 29-3:	Topología ATM Optimized Topology 2D para alabe principal y álabe divisor.....	66
Figura 30-3:	Mallado del Impeller	67

Figura 31-3:	Geometría de análisis CFX	68
Figura 32-3:	Condiciones de contorno de entrada del impulsor, simulación	69
Figura 33-3:	Definición de la Geometría de trabajo	71
Figura 34-3:	Tipo de fresadora para álabes múltiples mediante NX 12.....	72
Figura 35-3:	Configuración de la geometría del impeller mediante NX 12.....	73
Figura 36-3:	Montaje del impeller en la máquina CNC mediante NX 12.....	74
Figura 37-3:	Parámetros de desbaste del cubo.....	76
Figura 38-3:	Generación de la geometría de desbaste	77
Figura 39-3:	Simulación de la fabricación de desbaste mediante un acabado rugoso.....	78
Figura 40-3:	Finalización de los álabes mediante un acabado fino.....	79
Figura 41-3:	Parámetro para el acabado de los álabes.	80
Figura 42-3:	Simulación de acabado de los álabes.	81
Figura 43-3:	Programación para el acabado del cubo.....	81
Figura 44-3:	Parámetro para el acabado del cubo.....	82
Figura 45-3:	Simulación del acabado del cubo.....	83
Figura 46-3:	Programación para acabado con redondeo.....	84
Figura 47-3:	Programación para acabado con redondeo.....	85
Figura 48-3:	Operación transformar.	86
Figura 49-3:	Simulación de Matriz Polar.	87
Figura 50-3:	Simulación de mecanizado mediante Matriz Polar.	88
Figura 51-3:	Herramienta de desbaste KENNAMETAL F4AL0800AWL30L120.	89
Figura 52-3:	Herramienta de redondeo KENNAMETAL F4AL0800AWL30L120.	89
Figura 53-3:	Prototipo de impeller core cartridge impreso en 3D	90
Figura 1-4:	Simulación de flujo de la velocidad en la superficie del impeller	94
Figura 2-4:	Temperatura a lo largo de los álabes del impeller.....	95
Figura 3-4:	Presión a lo largo del impeller.	96
Figura 4-4:	Presión a lo largo de líneas de corriente a lo largo del álabe.....	96
Figura 5-4:	Eficiencia del impulsor	97
Figura 6-4:	Montaje del material en bruto en la CNC 5 ejes.	99
Figura 7-4:	Operación de desbaste en la CNC 5 ejes.....	100
Figura 8-4:	Terminado del desbaste del cubo en la CNC 5 ejes.	101
Figura 9-4:	Simulación del acabado del alabe principal y alabe separador.....	101

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A: G-CODE

ANEXO B: PLANOS DE CONSTRUCCIÓN DEL IMPELLER

ANEXO C: MODELO DE IMPELLER IMPRESO EN 3D

ANEXO D: OTRAS ALTERNATIVAS DE MODELADO CAM

ANEXO E: ENLACE SOFTWARE MATCH3 CON MÁQUINA HY 3040

ANEXO F: MECANIZADO DEL IMPELLER EN 3 EJES MEDIANTE LA MÁQUINA HY
3040

RESUMEN

Este estudio tuvo como objetivo presentar una alternativa de mecanizado para la realización de piezas o instrumentos mediante la utilización de máquinas herramientas CNC de 5 ejes con el fin de reemplazar a ciertos instrumentos que se los fabrica mediante fundición, el presente trabajo de titulación pretende servir como base para estudios posteriores con un fin específico la utilización software además de la utilización de la máquina CNC de cinco ejes. Para el diseño y la simulación del prototipo de impeller tipo core cartridge para Chevrolet LUV 2.2/2.5, se analizó varias metodologías así como investigaciones relacionadas con el tema, en el diseño nos enfocamos principalmente en tres softwares como lo son CAD, CAE, CAM especializados, el impeller se lo ha modelado de acuerdo a una escala que sea factible con este estudio de acuerdo a los requerimientos de ingeniería, donde posteriormente se procedió a la realización del modelado CAD, posteriormente se procede a importar al software CAE avanzado en el cual se evalúa el modelo en el cual van a estar presentes diversos análisis con el fin de validar este diseño y finalmente se realizó el modelo en software CAM en el cual es el encargado de generar todas las operaciones de mecanizado y posterior la generación del G-CODE en el cual se obtienen un lenguaje NC para obtener de esta manera un prototipo del impeller mediante la máquina CNC de 5 ejes, es recomendable realizarlo a gran escala si se proyecta la comercialización del mismo para generar rentabilidad, también se recomienda el uso del post procesador adecuado para la máquina a utilizar así como realizar la simulación en el modelado 3D con el fin de verificar que no exista choques entre las herramientas y la mesa en la cual se va a mecanizar.

Palabras clave: <FUNDICIÓN>, <PROTOTIPO>, < IMPELLER >, <DISEÑO ASISTIDO POR COMPUTADORA (CAD)>, <INGENIERÍA ASISTIDA POR COMPUTADORA (CAE)>, < MANUFACTURA ASISTIDA POR COMPUTADORA (CAM)>, < G CODE >.



31-03-2021

0905-DBRAI-UTP-2021

ABSTRACT

This study aimed to present a machining alternative for the elaboration of parts or instruments using 5-axis CNC machine tools to replace certain instruments that are manufactured by casting. The present work aims to serve as base for later studies with a specific purpose the use of software in addition to the use of the five-axis CNC machine. For the design and simulation of the core cartridge type impeller prototype for Chevrolet LUV 2.2 / 2.5, various methodologies were analyzed as well as research related to the subject. The design was focused mainly on three specialized software such as CAD, CAE, CAM. The impeller has been modeled according to a scale that is feasible with this study related to the engineering requirements. Later the CAD modeling was carried out, it was imported the advanced CAE software in which the model is evaluated to presented different analysis to validate this design. Finally, the model was made in CAM software in charge of generating all the machining operations and subsequent generation of the G-CODE in which a NC language is obtained to get in this way a prototype of the impeller by means of the 5-axis CNC machine, it is advisable to carry it out on a large scale. If the commercialization of the same is projected to generate profitability, it is also recommended to use the appropriate post processor for the machine to be used as well as to carry out the simulation in the 3D modeling to verify that there are no collisions between the tools and the table in which is going to be mechanized.

Keywords: <FOUNDRY>, <PROTOTYPE>, <IMPELLER>, <COMPUTER ASSISTED DESIGN (CAD)>, <COMPUTER ASSISTED ENGINEERING (CAE)>, <COMPUTER ASSISTED MANUFACTURING (CAM)>, <G CODE>.

INTRODUCCIÓN

El diseño de un impellers sigue siendo un reto de estudio hoy por sus geometrías complejas que se presenta al momento del diseño, con lo que se debe tener en cuenta el comportamiento tridimensional, para tener un mayor rendimiento en la turbomáquina que se vaya a emplear. Actualmente existen softwares comerciales, uno de ellos “Software CAD especializado,” son softwares que nos ayuda en forma preliminar del diseño de este tipo de impulsores, como se generara la geometría, y a su vez es una herramienta útil para poder entender de una forma más específica la geometría que poseen este tipo de elementos mecánicos. La manufactura de esta turbomáquina se ha visto la facilidad en los últimos años en emplear las maquinas herramientas CNC multiejes con las que se puede mecanizar este tipo de rodets de compresores, debido a la ventaja para evitar obstáculo y mejorara la eficiencia de corte y acabado de la superficie.

En Ecuador ha ido avanzando la tecnología de máquinas herramientas multiejes hacia la manufactura de piezas complejas necesarias por la industria, en la actualidad la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo ha visto limitado el uso de esta tecnología por el desconocimiento de la misma, otro factor importante en la fabricación de este tipo de piezas con la tecnología CNC multiejes, esto se debe al elevado costo que se tiene al fabricar una determinada geometría, de la misma forma en el país actualmente existe un déficit de personal cualificado para la operación de este tipo de maquinaria.

Para el Ecuador es como una necesidad el hecho de contar con esta tecnología, debido a que presenta gran control del elemento que se quiera fabricar, de la misma manera en la cual está a disposición geometrías complejas para su maquinado, debido al alza en la demanda de este tipo de componentes en la industria, para este tipo de aplicaciones se considera adecuado la producción mediante el uso de la maquinaria CNC multiejes.

En la escuela de Ingeniería Mecánica se han venido realizando proyectos relacionados con la manufactura así como la simulación en software CAD, por lo que se requiere realizar un estudio detallado en el cual intervienen las trayectorias, igualmente como los movimientos de corte a realizar con la máquina CNC de cinco ejes, esto se plantea realizarlo mediante la utilización de un software CAD/CAM, con el cual se diseñe el impellers con sus parámetros requeridos y con el software CAD adecuado se puede obtener el código de programación con el fin de insertar dicho código en la máquina, para realizar la manufactura deseada con el fin de realizar un prototipo de impeller mediante tecnología CAD/CAM.

CAPÍTULO I

DIAGNÓSTICO DEL PROBLEMA

En este capítulo se recopilará información acerca del marco referencial necesario para el desarrollo del proyecto de titulación en el cual se detallan los diversos aspectos metodológicos, así como antecedentes.

2.1 Antecedentes

Actualmente en la sociedad en la cual vivimos vemos cómo va avanzando la tecnología convirtiéndose en una fuerza impulsora del sector industrial en nuestro país los últimos años, así como los métodos de fabricación de los distintos elementos en la industria, por lo que con cada día que pasa vemos la invención de nuevos procesos tecnológicos, mucho más novedosos y al alcance de nuestras manos por lo que es importante el desarrollo de este tipo de procesos como son el manufacturado con tecnología CAM de la misma forma el desarrollo del diseño asistido por computadora o conocido por sus siglas en inglés CAD, siendo estos por los que la industria se ha beneficiado mediante la optimización y reducción de tiempos de producción como claro ejemplo la utilización de la automatización de máquinas herramientas de control numérico computarizado (CNC) (Acosta 2017).

En Ecuador, así como en la Escuela Politécnica de Chimborazo contamos con la tecnología de máquinas herramientas multiejes las cuales son usadas para la fabricación de piezas a nivel de la industria como también para la utilización académica, pero no se han desarrollado proyectos de manufactura CNC que demanden de un mecanizado multiejes, este tipo de tecnología nos presenta la ventaja principal de poder mecanizar elementos de máquinas con geometrías complejas como es el caso del impeller el cual, no se fabrica en el país sino más bien se importa, produciendo costes excesivos(Castillo 2016). Es importante este tipo de implementación de conocimientos pues ya sea de manera directa o indirecta el involucrar a los estudiantes para la mecanización de prototipos de producción de elementos de máquina de manera más rápida y sencilla con diferentes formas, así como geometrías complejas, sin embargo, este tipo de desarrollo tecnológico en nuestro país es limitado debido a los procesos de fabricación comparado con grandes empresas (Gutiérrez 2017).

El objetivo principal de este estudio de pre grado se basa en realizar una guía técnica para el manejo de la máquina herramienta CNC de cinco ejes, mediante el uso de herramientas que disponemos en la Escuela de Ingeniería Mecánica tanto físicos como tecnológicos para el diseño y manufactura de un prototipo de impeller, para lo cual se establece parámetros de trabajo como diseño de la geometría mediante software CAD, obtención del código de trabajo que se insertara, y manufactura del impeller propuesto en la máquina CNC de cinco ejes. Con el uso de esta tecnología multiejes se pueden fabricar elementos de maquina con formas complejas ayudados de librerías que nos brindaran los softwares CAM, que puede ser aplicados en muchas áreas de la industria como son: aeronáutica, industria hidroeléctrica, industria automotriz, etc.

En la Facultad de Mecánica de la ESPOCH, contamos con una máquina herramienta multiejes CNC, aprovecharemos esta tecnología para la fabricación del Impeller, haciendo el uso de los recursos disponibles y de talento humano.

2.2 Formulación del Problema

Actualmente en el Ecuador como en nuestra institución contamos con la tecnología de máquinas herramientas multiejes, para la fabricación de diferentes elementos de máquinas a nivel industrial como nivel académico, pero dicha tecnología no se está aprovechando al 100% al nivel global como en otros países, debido a la dificultad que precede la operación de esta máquina herramienta, puesto que con esta tecnología se pueden manufacturar elementos de máquinas con geometría complejas como el IMPELLERS dicho componente de un turbocompresor, su manufactura es un reto tecnológico que es superado con tecnología CAM multiejes, ayudado de librerías que nos brindan los software CAM, que pueden ser aplicados en muchas áreas de la industria como son: aeronáutica, industria hidroeléctrica, industria automotriz, etc. Actualmente en la facultad de mecánica de la ESPOCH, contamos con una maquina herramientas multiejes CNC.

2.3 Justificación

2.3.1 Justificación Teórica

Las maquinas control numérico computarizado o también llamadas CNC, son herramientas que realizan trabajos de alta precisión tanto en 2D como en 3D en diversos materiales, por tal motivo

su costo es elevado además de que su mantenimiento requiere mano de obra calificada tanto en el aspecto de software como hardware. Por tal motivo lo que se pretende realizar es la construcción de una guía práctica para la utilización de la maquina CNC multiejes que posee la Escuela de Ingeniería Mecánica, con el fin de que se sigan realizando este tipo de trabajos de investigación puesto que esto representa una ventaja tecnológica en este campo.

Para el diseño y construcción del Impeller *para un turbocompresor tipo core cartridge para Chevrolet luv 2.2/2.5*, se hará uso de conocimiento de análisis mediante conocimientos de manejo de software CAE, con el fin de determinar y obtener la geometría de los álabes del impeller para su posterior mecanizado, esta geometría servirá para la construcción de las superficies del alabe del Impeller; este prototipo será simulado mediante dicho software con el fin de garantizar su funcionalidad y su aprobación para entrar a la etapa de prototipado mediante impresión en 3D y mecanizado CNC multiejes.

2.3.2 Justificación Metodológica

Con el fin de obtener los resultados establecidos, empezaremos mediante un razonamiento inductivo para la obtención de la geometría del impeller propuesto para lo que, hemos creído óptimo la utilización del software CAD especializado el cual nos brinda la facilidad de diseñar los álabes del impeller según nuestra conveniencia, siendo este método el más óptimo pues esto nos ayudará a gestionar mejor el desarrollo de este prototipo, posteriormente se aplicará un método analítico, el cual inicia con la identificación con cada una de las partes con las que conforman nuestro proyecto, basándose en la información obtenida de la bibliografía previamente investigada para proceder con un método experimental el cual nos brinda la capacidad de solucionar de una manera eficiente los posibles errores que se puedan presentar en el desarrollo de este estudio.

2.3.3 Justificación Práctica

A medida que avanza la tecnología, se ha visto cómo evolucionan los procesos de fabricación de elementos mecánicos, lo que hace que muchos modelos y diseños se vayan descontinuando y cada vez sea más complicado encontrarlos en el mercado, debido a los métodos de fabricación que

fueron descartados a través del tiempo, haciendo que la fabricación de estos elementos sea más fácil.

El presente proyecto tiene como propósito diseñar, validar y fabricar un prototipo de Impeller de uso industrial, en la fase del diseño conceptual se podrá variar los parámetros dimensionales, geométricos, restricciones de flexibilidad en la orientación de la herramienta. Mecanizar mediante 5 ejes simultáneos que permita maquinar las geometrías complejas de los alabes utilizando Centro de Mecanizado CNC 5 ejes de la Facultad de Mecánica.

2.4 Alcance

El proyecto tiene como finalidad la obtención de un prototipo de impeller para un turbocompresor tipo Core Cartridge para Chevrolet Luv 2.2/2.5 mediante impresión en 3D fabricado en PLA, así como su diseño de su geometría, así como de sus álabes mediante el software CAD avanzado y simulación mediante software CAM avanzado, además de generar una guía de práctica para la utilización y mecanizado del Impeller mediante un centro de mecanizado CNC cinco ejes.

2.5 Objetivos

2.5.1 Objetivo general

Diseño y construcción de un prototipo de impeller para un turbocompresor tipo core cartridge para Chevrolet luv 2.2/2.5 aplicando tecnología CAD-CAM-CAE.

2.5.2 Objetivos específicos

- Generar el modelo paramétrico de las curvas guías de las superficies del alabe usando herramientas de software CAD avanzado.
- Diseñar y validar el prototipo de impeller mediante software CAD-CAE.
- Obtener un prototipo de Impeller para turbocompresor mediante impresión en 3D y simulación mediante software CAM.

CAPÍTULO II

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

En este capítulo se recopila la investigación necesaria referente a impulsores centrífugos, tanto del marco conceptual como del marco teórico, tipos, parámetros de diseño y procesos de manufactura en la construcción del impulsor centrífugo.

2.1 Turbocompresor

Los turbocompresores son turbomáquinas que sirven para comprimir un gas también es el componente de mayor importancia de la máquina para aumentar la potencia de un motor de combustión interna (Miller, 2008). Este tipo de elementos son óptimos para la sobrealimentación, la cual presenta como mayor ventaja de trabajar sin realizar un consumo de potencia del motor, dado que el turbocompresor aprovecha los gases que son eliminados por el motor, además de que tienen la capacidad de trabajar a elevadas revoluciones por minuto (hasta 200 000 r.p.m.) en turbos pequeños (Gordillo y Sánchez, 2006).

2.2 Tipos de turbocompresores.

Los turbocompresores en los últimos años han mejorado con el propósito de tener una mayor relación potencia/peso que es una de las bases fundamentales para implementar los turbocompresores en los motores sobrealimentados, como los gases de escape que sale del motor provocan la acción de una turbina la cual se encuentra conectada con el impulsor por medio de un eje este provoca la rotación del impulsor. Uno de los problemas presentes es que el turbocompresor girará más rápidamente, como se tendrá mayor presión de inyección de aire al motor se pueden producir inconvenientes que puede provocar algún colapso de algún elemento del motor para evitar estos problemas se han implementado diferentes configuraciones para adaptarse a servicios específicos y clasificación de presión en el sistema. Se clasifican de la siguiente manera. (Guaita y Sarango, 2013):

- Turbocompresores de geometría fija
- Turbocompresores de geometría variable.

2.2.1 *Turbocompresor de geometría fija.*

Está formado principalmente por una turbina y un compresor que se encuentran introducidos en sus respectivas carcargas de formas opuestas y unidas ambas por un eje común. Tanto la turbina como el compresor contienen álabes para conseguir aumentar la presión de alimentación. Además, posee una válvula de descarga denominada wastegate la cual se encarga de limitar la presión de sobrealimentación, desviando una determinada cantidad de gases combustiónados previamente hacia el escape sin que estos pasen por la turbina (Miller, 2008).

2.2.2 *Turbocompresor de geometría Variable*

Este tipo de turbocompresores poseen la característica de tener una gran respuesta a regímenes de funcionamiento del motor, eliminando el gran inconveniente de los turbocompresores de geometría fija, además de ser los más usados en vehículos modernos, a diferencia de los de geometría fija este tipo de turbocompresores utilizan una electroválvula en lugar del wastegate, la cual comanda la presión de una capsulada neumática, encargada del desplazamiento de unas varillas de accionamiento (Diez, 2005).

2.3 **Clasificación de los turbocompresores.**

Este tipo de turbomáquinas se clasifican según la dirección de su flujo teniendo tres tipos, radiales, diagonales (semi axiales, radios axiales, flujo mixto) y axiales. Se denominan compresores centrífugos tanto a los radiales como a los de flujo mixto a diferencia de los axiales, estos últimos son poco utilizados y diferentes de los centrífugos (Mataix, 1991).

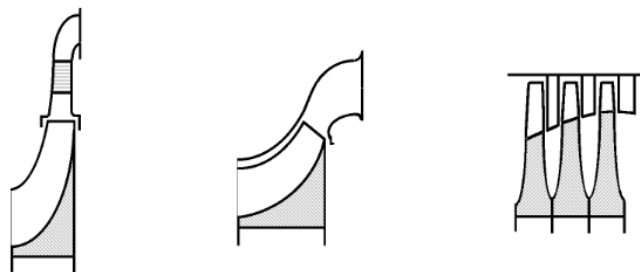


Figura 1-2: Corte meridional de un turbo compresor a) Radial; b) Diagonal; c) Axial.

Fuente: (Mataix, 1991).

2.4 Rendimiento de los turbocompresores.

El rendimiento presente de los turbocompresores axiales es mayor al radial, sin embargo, este último es mucho más sensible a la variación de carga, debido a que si se varía las condiciones de funcionamiento a las que fueron diseñadas se verá como existe un decremento en el rendimiento, es decir la curva de rendimiento en función del caudal del turbocompresor radial es más plana (Mataix, 1991).

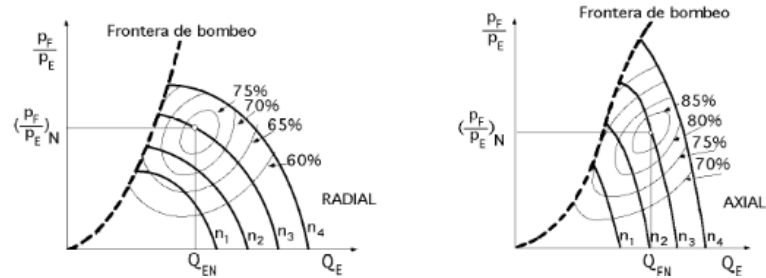


Figura 2-2: Curvas características de un turbocompresor: a) radial; b) axial, con curvas límites de bombeo

Fuente:(Mataix, 1991).

2.5 Número específico de revoluciones de los Turbocompresores radiales y axiales

Los turbocompresores centrífugos son máquinas que trabajan a un determinado número de revoluciones, este tipo de artefactos pueden diseñarse para un tipo de admisión sencilla, el cual admite caudales mínimos de 500 m^3 y con admisión doble pueden llegar hasta los 290000 m^3 , en cambio los turbocompresores axiales que son superiores a los centrífugos en el campo de flujo pueden construirse para caudales superiores a $1000000 \text{ m}^3/h$, el funcionamiento estable para este tipo de herramientas se limita a la relación de compresión, de tal modo los turbocompresores centrífugos poseen una relación de compresión de 10 a 12 mientras que los de tipo axial pueden llegar a rangos de 6 a 8 (Mataix, 1991).

El número específico de revoluciones (θ) de un turbocompresor es adimensional y se define de la siguiente manera:

$$\theta = \frac{\sqrt{\Phi}}{\psi^{3/4}} \quad (1)$$

Donde:

- ψ : Coeficiente de carga
- ϕ : Coeficiente de caudal

$$\psi = \frac{T_u}{u_e^2/g} = \frac{\text{Salto isentrópico en el escalón}}{\text{Energía correspondiente a la velocidad periférica del rodete}} \quad (2)$$

$$\phi = \frac{C_m}{u_e} = \frac{4Q}{\pi d_e^2 u_e} \quad (3)$$

Valores usuales del coeficiente de caudal en los turbocompresores: $\left\{ \begin{array}{l} TC \text{ Radiales: } 0,01/0,08 \\ TC \text{ Diagonales: } 0,05/0,4 \\ TC \text{ axiales: } 0,05/0,5 \end{array} \right.$

El número específico de revoluciones n_q se refiere a las condiciones de rendimiento óptimo:

$$n_q = \frac{\sqrt{Q}}{T_u^{3/4}} = \left\{ \begin{array}{l} TC \text{ Radiales: } n_q = 0,4744 \frac{\sqrt{Q_r}}{T_u^{3/4}} \\ TC \text{ axiales: } n_q = 0,4744 \sqrt{1-v^2} \frac{\sqrt{Q_a}}{T_u^{3/4}} \end{array} \right. \quad (4)$$

La relación entre los coeficientes θ y n_q es: $0,4744 \sqrt{\frac{\rho_{total}}{\rho_{estática}}}$, siendo la gran mayoría casos prácticos donde: $\sqrt{\frac{\rho_{total}}{\rho_{estática}}} = 1$

2.6 Turbocompresor centrífugo

Tanto los compresores centrífugos como los de flujo axial son clasificados como compresores dinámicos, estos logran incrementar la presión mediante una transferencia un energía dinámica por una corriente de fluido continuo a través de los impulsores (impellers), por lo que existe un incremento sustancial en el radio de rotacional a lo largo de las aspas del compresor centrífugo, debido a esta razón este tipo de turbo máquinas superan a su homologado radial en cuanto a presión

se refiere, mientras que estos últimos los superan en cuanto al flujo se refiere (Aungier, 2000 y Hanlon, 2001).

Los compresores centrífugos en general se utilizan para relaciones de presión más altas y velocidades de flujo más bajas en comparación con las relaciones de presión de etapa más baja y las velocidades de flujo más altas en los compresores axiales. La región más eficiente para la operación del compresor centrífugo se encuentra en un rango de velocidad específico entre $60 <Ns> 1,500$. Las velocidades específicas de más de 3.000 generalmente requieren un compresor de flujo axial (Boyce, 2013).

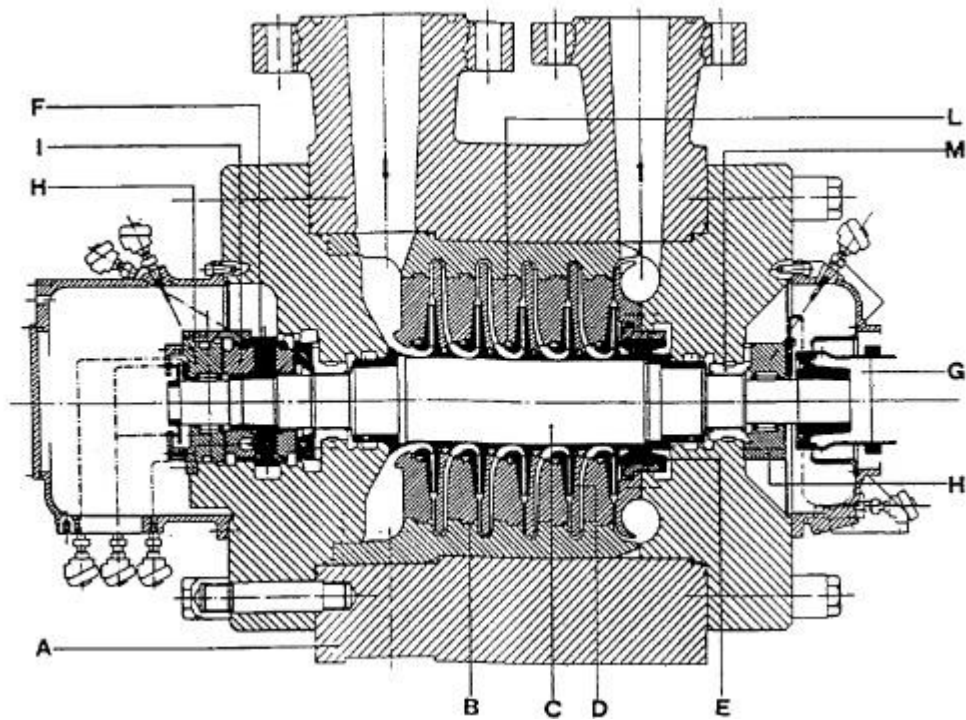


Figura 3-2: Vista seccional de un compresor centrífugo.

Fuente: (Hanlon, 2001)

Un compresor centrífugo está constituido por las siguientes partes:

- A. Carcasa exterior: Dentro de esta se encuentra el estator.
- B. Diafragma.
- C. Eje del rotor.

- D. Impulsor (Impeller).
- E. Tambor de equilibrio.
- F. Collar de empuje.
- G. Cubo.
- H. Cojinete radial.
- I. Cojinete de empuje.
- L. Empaque del rotor
- M. Empaque de la película de aceite.

2.6.1 Funcionamiento de un turbocompresor centrífugo

El funcionamiento de un turbocompresor consiste en la rotación del impeller para energizar el fluido, así como al difusor para recuperar parte de la energía cinética antes que el fluido entre en la voluta. Este proceso de difusión puede ser asistido por paletas estacionarias en el difusor, también llamado difusor estacionario; finalmente la voluta es empleada para recoger el fluido de la salida del difusor dentro de la tubería de descarga, una alternativa a la voluta también es un colector el cual es similar a la voluta, pero tiene un área de sección transversal en su dirección circunferencial. (Aungier, 2000).

El gas se introduce en el compresor a través de una boquilla de succión y entra en una cámara anular (voluta de entrada), que fluye desde el mismo hacia el centro desde todas las direcciones en un patrón radial uniforme. En el lado opuesto de la cámara desde la boquilla de succión hay una aleta para evitar los vórtices de gas, este fluye hacia el diafragma de succión y luego es recogido por el impulsor (impeller). Los impulsores consisten en dos discos, denominados disco y cubierta, conectados por álabes que se contraen en el eje y se mantienen con una o dos llaves (Hanlon, 2001 y Aungier, 2000).

El impulsor empuja el gas hacia afuera aumentando su velocidad y presión; la velocidad de salida tendrá un componente radial y tangencial. En el lado del disco, el impulsor está expuesto a la presión de descarga y, por otro lado, en parte a la misma presión y en parte a la presión de succión. Por lo tanto, se crea una fuerza de empuje hacia la succión (Hanlon, 2001).

2.7 Rodete

En una turbomáquina el único componente de incrementar la entalpía total del fluido de trabajo es el rodete. Este componente es el encargado de generar la energía necesaria para alcanzar las

condiciones óptimas de trabajo (Nieto, 2019). El rodete es un elemento mecánico el cual consta de un determinado número de álabes, los cuales se fijan al cubo del rodete. Estos elementos pueden variar su geometría, así como su número de álabes, debido a las diversas configuraciones según se necesite el fabricante o para un determinado propósito. La condición para que el rodete posea un rendimiento máximo es el de que la entrada cuando no exista rotación sea $c_{1u} = 0$ o a su vez que $\alpha_1 = 90^\circ$, siendo este el caso más frecuente, en otras ocasiones el gas posee una contra rotación, $c_{1u} > 0$ o una rotación $c_{1u} < 0$ para lo cual se debe colocar una corona directriz fija antes del rodete la cual debe cotar con álabes con un ángulo de entrada α_1 , que sea conveniente para cada uno de los casos citados anteriormente (Mataix, 1991 y Díez, 2005).

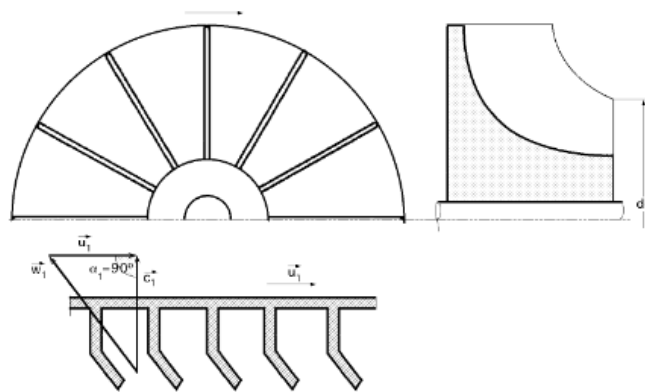


Figura 4-2: Rodete de entrada y salida radial.

Fuente: (Díez, 2005)

2.7.1 Tipos de rodetes

Actualmente la mayoría de los turbocompresores son de geometría abierta, no posee pared superficial del canal (Nieto, 2019). Para cumplir con este objetivo el rodete consta de dos componentes básicos como un inductor como un rotor de flujo axial y los álabes radiales donde se imparte la energía por la fuerza centrífuga. Al ingresa el flujo al rodete en dirección axial y pasa a través de los álabes cambiando las propiedades del fluido y sale en forma radial (Boyce, 2013).

Las variaciones de velocidades en el cubo dan como resultado cambios en la dirección del flujo y esto conlleva a que la configuración del diseño del impulsor sea más compleja. Tenemos dos sistemas de alimentación de los impulsores, de entrada, simple y de entrada doble. Según su configuración y función hay diferentes tipos de rodetes como se muestra a continuación: Rodete

abierto, rodete semiabierto de simple aspiración, rodete semiabierto de doble aspiración, rodete cerrado de doble aspiración, y rodete cerrado de simple aspiración. Se presentan algunas ventajas y desventajas para cada tipo, dichas consideración pueden ser consideraciones para el diseño (Mataix, 1991).

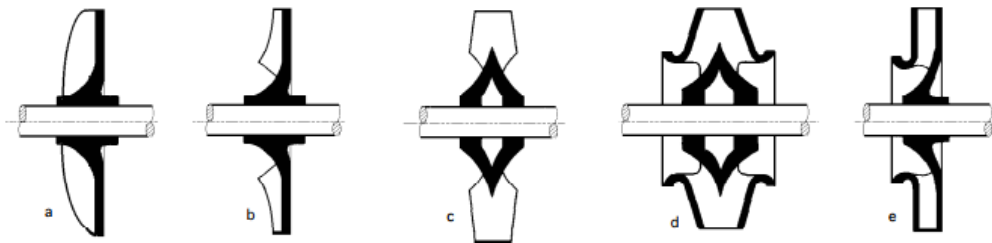


Figura 5-2: Rodetes; a) Abierto; b) semiabierto; c) Semiabierto de doble aspiración; d) Cerrado de doble aspiración; e) Cerrado de simple aspiración.

Fuente: (Mataix, 1991).

Rodete abierto: Fig. a, este tipo de rodete no brinda buen rendimiento de la turbomáquina, porque solo permitir velocidades periféricas muy bajas, como se han desarrollado nuevas configuraciones este tipo de rodete es cada vez menos empleado.

- Rodete cerrado. Fig. d, este tipo de rodete cerrados son de buen rendimiento, pero su construcción es más compleja que los anteriores casos y sus velocidades periféricas de operación son moderadas.

En los turbocompresores centrífugos de alta presión con múltiples escalonamientos, para obtener una mejor optimización en la entrada del fluido los dos primeros escalonamientos se construyen de dobles aspiración, porque últimamente estas turbomáquinas deben ser de mayor eficiencia debido a la alta demanda del consumen energético que existe actualmente, es por ello por lo que se requiere mayor aspiración de caudal para obtener una mayor relación de compresión. Es por ello, que un tipo de rodete sobresale de las dos configuraciones anteriores con la cual se aprovecha su rendimiento.

- Rodete semiabierto: Fig. b, en esta configuración de rodete, es el más recomendable por su versatilidad del cual se caracterizan los alabes de este tipo de rodete, del cual se aprovecha su

mayor caudal, su velocidad de rotación y su mayor relación de compresión. Mediante el ángulo su salida β_2 se clasifican en tres tipos según los ángulos de los alabes.

Alabes curvados hacia atrás o barrido hacia atrás, $\beta_2 < 90^\circ$ (a)

Alabes curvados hacia adelante o barrido hacia adelante $\beta_2 > 90^\circ$ (b)

Alabes de salida radial $\beta_2 = 90^\circ$ (c)

Estos tres tipos de configuraciones de sus alabes tiene diferentes características con relación teórica de flujo de carga, como se muestra en la siguiente figura.

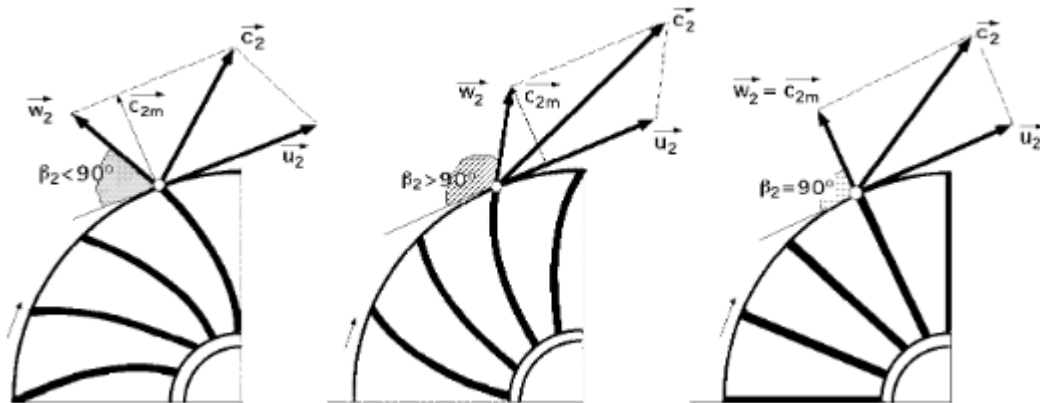


Figura 6-2: Rodetes semiabiertos; a) Curvados hacia atrás; b) Curvados hacia delante; c) De salida radial.

Fuente:(Mataix, 1991)

Cuando el ángulo β_2 de alabes positivo produce un pre-remolino en la dirección de la rotación del impulsor, mientras que un ángulo β_2 de alabes negativo produce un pre-remolino en sentido contrario a la rotación del impulsor (Boyce, 2013).

Actualmente se emplea el rodete semiabierto con álabes de salida radial, con un ángulo de salida del alabe $\beta_2 = 90^\circ$, pero curvado en la entrada del flujo. De tal manera que el ángulo β_1 de la velocidad relativa sea el requerido por una entrada radial de la corriente absoluta ($\alpha_1 = 90^\circ$) (Mataix, 1991).

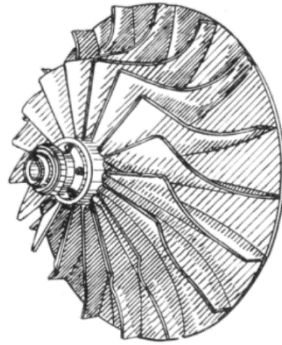


Figura 7-2: Rodete de turbocompresor con álabes de salida radial, curvados a la entrada, del tipo semiabierto.

Fuente:(Mataix, 1991)

Con esta configuración del ángulo de entrada y salida los impulsores actuales disminuyen los esfuerzos centrífugos a esfuerzos de tracción. Es por ello por lo que para la fijación de los álabes solo se requiere un disco (rodete semiabierto). Este tipo de rodete se alcanzan velocidades periféricas relativamente altas, pudiendo llegar a los 500 m/s, anteriormente, con álabes de salida hacia atrás no sobrepasaba los 300 m/s (Mataix, 1991).

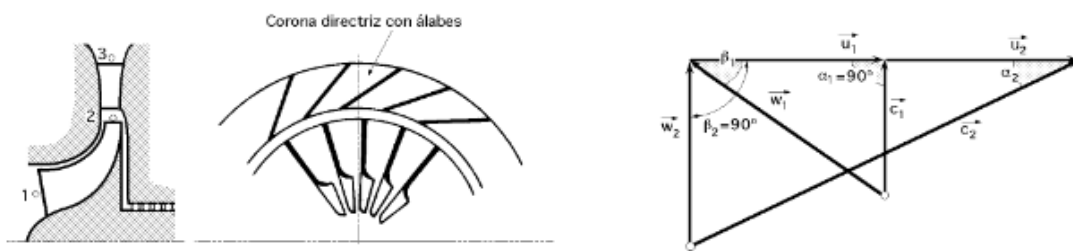


Figura 8-2: Turbocompresor centrífugo con álabes del rodete curvados a la entrada y salida real.

Fuente:(Mataix, 1991)

2.8 Sistema inductor

La función del inductor es incrementar el momento angular sin modificar el radio de rotación. Una sección de los álabes forman una curvatura hacia la dirección de rotación. En esta sección se

forman 3 líneas de inclinación del inductor en dirección axial del rodete se forman arco circular, arco parabólico y arco elíptico. Las líneas que forman el arco circular son empleadas en compresores de baja presión, mientras que los arcos elípticos tienen buen rendimiento en relación de altas presión donde el flujo tiene números transónicos de Mach (Boyce, 2013).

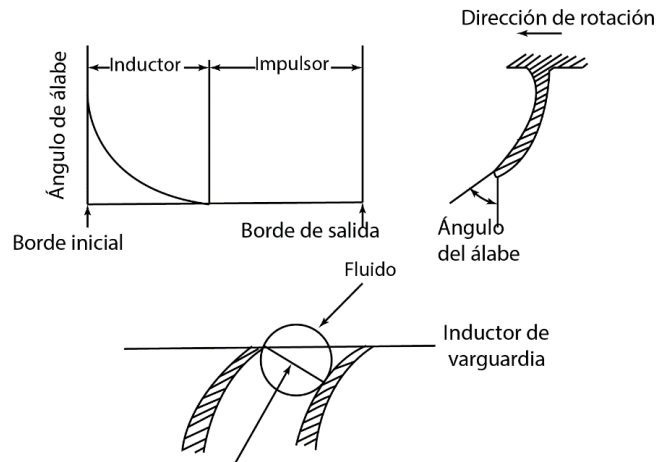


Figura 9-2: Inductor de un compresor centrífugo.

Fuente:(Boyce 2013)

Pero los rodetes semiabiertos presentaron problemas de asfixia en el inductor, es por ello por lo que en los rodetes actuales se incorporan un diseño de alabe separador. Este patrón de flujo indica una separación en el lado de la succión de los alabas separadores(Boyce, 2013).

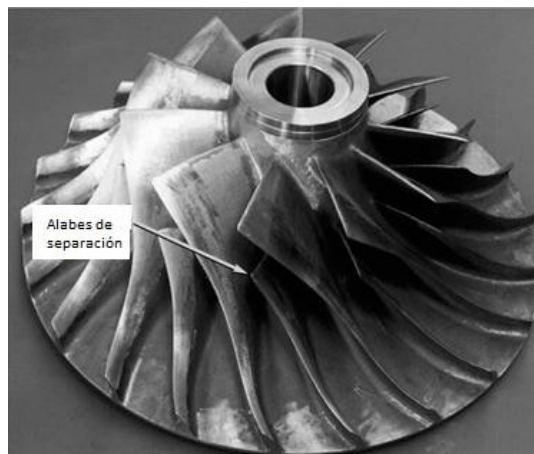


Figura 10-2: Impulsor de cara abierta con cuchillas separadoras.

Fuente:(Boyce, 2013)

2.9 Sistema difusor

Este componente es uno de los acoplamientos del turbocompresor que tiene como finalidad convertir la alta velocidad de salida del impulsor en presión estática. La velocidad C_2 que es a la entrada del difusor se reduce adiabáticamente a una velocidad C_3 que es a la salida del difusor y la presión estática aumenta desde la presión P_2 a una presión P_3 , mientras que la presión total y la temperatura se mantienen constantes como se puede observar en la siguiente figura (Dixon, 1988).

En un difusor subsónico, el área de flujo aumenta. La garganta del difusor es una región donde el número Mach alcanza el flujo sónico y controla el flujo en el difusor, los efectos del número mach son importantes para la aparición de pérdidas en el difusor. Los canales del difusor jugando un papel vital para obtener un buen rendimiento del turbocompresor. Tiene como función es recuperar la máxima energía cinética posible, para minimizar las pérdidas totales de presión. Así mismo como la entalpía de estrangulamiento en un flujo adiabático estaba sin trabajo del eje, es constante (Boyce, 2013 y Hanlon, 2001).

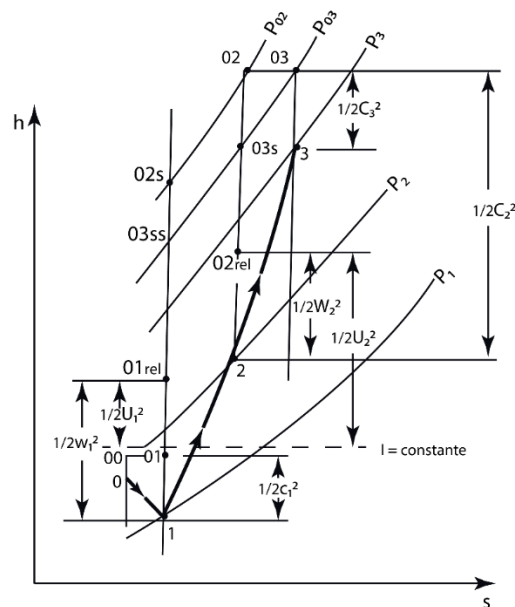


Figura 11-2: Diagrama de Mollier para la etapa completa del compresor centrífugo.

Fuente: (Dixon, 1988)

2.10 Relación de compresión máxima en una etapa de un Turbocompresor centrífugo.

Cuando el ángulo $\alpha_1 = 90^\circ$, se obtiene una relación de compresión máxima teórica alcanzable en una sola etapa es:

$$\text{Relacion de compresion: } \varepsilon_c = \frac{p_3}{p_1} = \left(\frac{\gamma - 1}{\gamma} \frac{\mu_2 c_{2u}}{RT_1} + 1 \right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} \quad (5)$$

Donde:

p_1 : Presión absoluta en la aspiración

p_3 : Presión absoluta en el escape

Si no se toma en cuenta ω_2 frente a μ_2 se cumple que: $c_2 = \mu_2 = r\omega$, y, por lo tanto, que:

$\begin{cases} \mu_2 = c_{2u} \\ \beta_2 = 90^\circ \end{cases}$, por lo tanto, la relación quedaría de la siguiente manera.

$$\varepsilon_c = \frac{p_3}{p_1} = \left(\frac{\gamma - 1}{\gamma} \frac{\mu_2^2}{RT_1} + 1 \right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} \quad [6]$$

En los turbocompresores centrífugos, si el impulsor gira a una velocidad constante y desplaza cierta cantidad de flujo másico; mientras mayor sea la temperatura de entrada del gas, menor será la relación de compresión que se genera en el turbocompresor, es por eso por lo que la relación de compresión no depende de la presión sino de la temperatura de entrada al impulsor (Castillo, 2016).

2.11 Impulsor.

Un impulsor en un compresor centrífugo distribuye energía a un fluido determinado, este consta de dos componentes básicos; un inductor como un rotor de flujo axial, y las palas radiales donde la energía es impartida por la fuerza centrífuga. El flujo ingresa al impulsor (impeller) en la dirección axial y sale en la dirección radial. Las variaciones de velocidad de cubo a cubierta como resultado de estos cambios en las direcciones de flujo complican el procedimiento de diseño de los compresores centrífugos (Boyce, 2013).

Los impulsores pueden cerrarse haciendo que la cubierta se adhiera a los extremos del álabe o sin cerrarse con un pequeño espacio libre entre los extremos del álabe y la pared estacionaria. Si el

impulsor está cerrado o no a la superficie, generalmente se llama cubierta. Cubrir un impulsor tiene el mérito de eliminar las pérdidas por fugas en la punta, pero al mismo tiempo aumenta las pérdidas por fricción. Estudios realizados en NACA han demostrado que este tipo de impulsores se ven perjudicados a altas velocidades mientras que son beneficiados cuando las velocidades son bajas (Dixon, 1988).

Los modelos presentados por estas teorías de diseño se basan en las tridimensionales o cuasi tridimensionales las cuales se componen de dos soluciones, una en la superficie meridional y la otra en la superficie de revolución de la corriente. Mediante la aplicación del método anterior utilizando una solución numérica para las ecuaciones de flujo complejas, Es posible lograr eficiencias del impulsor de más del 90%. El fenómeno de flujo real en un impulsor es más complicado que el calculado (Boyce, 2013 y Wu, 1995).

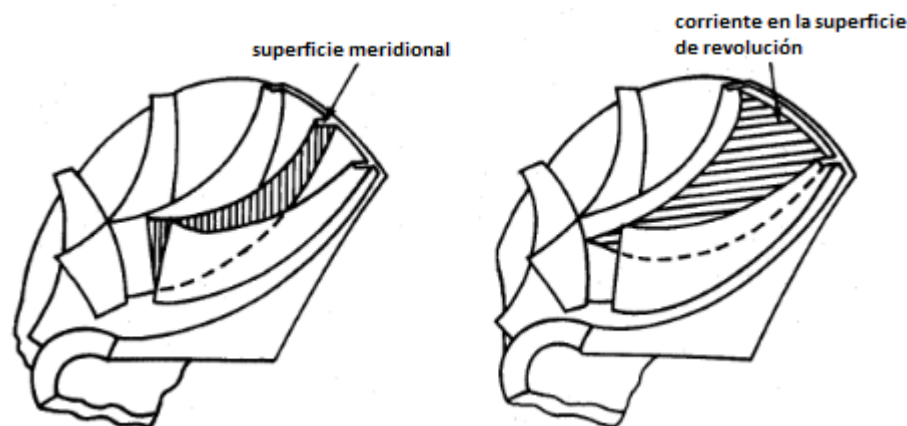


Figura 12-2: Los dos mayores planos en un impulsor centrífugo.

Fuente:(Boyce, 2013)

El movimiento tridimensional general tiene componentes de velocidad c_r, c_θ y c_x respectivamente en las direcciones radial, tangencial y axial y $c^2 = c_r^2 + c_\theta^2 + c_x^2$. (7)

Donde la rotalpía (Contracción de la entalpía de estancamiento rotacional) es:

$$I = h + \frac{1}{2}(c_r^2 + c_\theta^2 + c_x^2 - 2U_{c\theta}). \quad (8)$$

Añadiendo y sustrayendo $\frac{1}{2}U_{c\theta}$ entonces tenemos.

$$I = h + \frac{1}{2}\{(U - c_\theta)^2 + c_r^2 + c_x^2 - (U^2)\} \quad (9)$$

Del triángulo de velocidades tenemos la siguiente relación:

$$U - c_\theta = w_\theta \quad (10)$$

Donde:

$$w^2 = c_r^2 + w_\theta^2 + c_x^2 \quad (11)$$

$$I = h + \frac{1}{2}(w^2 - U^2) \quad (12)$$

O

$$I = h_{0rel} - \frac{1}{2}U^2. \quad (13)$$

Desde

$$h_{0rel} = h + \frac{1}{2}w^2. \quad (14)$$

Debido a que $I_1 = I_2$ (15), a lo largo del impulsor (impeller), entonces.

$$h_2 - h_1 = \frac{1}{2}(U_2^2 - U_1^2) + \frac{1}{2}(w_1^2 - w_2^2). \quad (16)$$

La expresión anterior proporciona la razón por la cual el aumento de la entalpía estática en un compresor centrífugo es tan grande en comparación con un compresor axial de una sola etapa. En el lado derecho de la ecuación (16), el segundo término $\frac{1}{2}(w_1^2 - w_2^2)$, es la contribución de la difusión de la velocidad relativa y también se obtuvo para los compresores axiales. El primer término, $\frac{1}{2}(U_2^2 - U_1^2)$, es la contribución debido a la acción centrífuga, que es cero si las líneas de corriente permanecen en los mismos radios antes y después del impulsor (Dixon, 1988).

Los efectos de la alta velocidad relativa en la entrada del impulsor se experimentan como efectos del número Mach en los compresores y efectos de cavitación en las bombas. El método habitual para establecer la rotación previa requiere la instalación de una hilera de paletas guías a la entrada aguas arriba del impulsor (impeller), cuya ubicación depende del tipo de entrada (Dixon, 1988).

2.12 Triángulos vectoriales

El aire entra en las paletas del impulsor con el diámetro d_1 . La velocidad absoluta del gas que se aproxima a las paletas es V_l . El gas se acerca al álabe en una dirección radial después de entrar en el impulsor en una dirección axial y hace el giro en una dirección radial dentro del impulsor. La velocidad del borde de ataque de la paleta está representada por el vector de velocidad u_1 . La velocidad neta es la velocidad relativa, V_{rel} . Cabe señalar para este ejemplo básico que el vector de velocidad relativa se alinea sí mismo con el ángulo, β_1 , del álabe, lo que resulta en cero incidencias. En este caso idealizado, el vector de flujo meridional, V_{ml} , está alineado con la velocidad absoluta y es igual a ella (Brown, 2005).

Después de pasar entre los álabes, el gas sale del impulsor con el diámetro d_2 . La velocidad del gas justo antes de salir del impulsor es la velocidad relativa, V_{r2} , y sale en el ángulo del álabe β_2 , en el ejemplo idealizado. Mediante la adición del vector de velocidad de la punta del impulsor, u_2 , se genera la velocidad de salida absoluta, V_2 . El ángulo del vector de flujo absoluto es α_2 . Esta es la velocidad y dirección que asume el gas cuando sale del impulsor y entra en el difusor. La velocidad meridional, V_{m2} , se muestra mediante el vector radial que pasa por el vértice del triángulo de velocidad de salida. Si la paleta fuera radial en lugar de inclinada hacia atrás ($\beta_2 = 90$ *grados*), la velocidad relativa y la velocidad meridional serían iguales y alineadas (Brown, 2005).

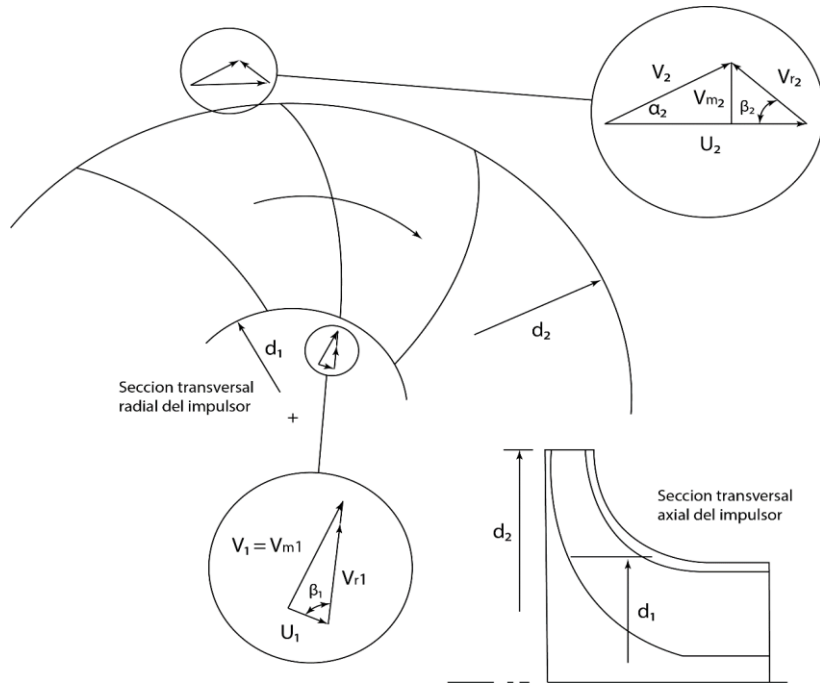


Figura 13-2: Triángulos vectoriales de flujo de entrada y salida del impulsor

Fuente: (Brown, 2005).

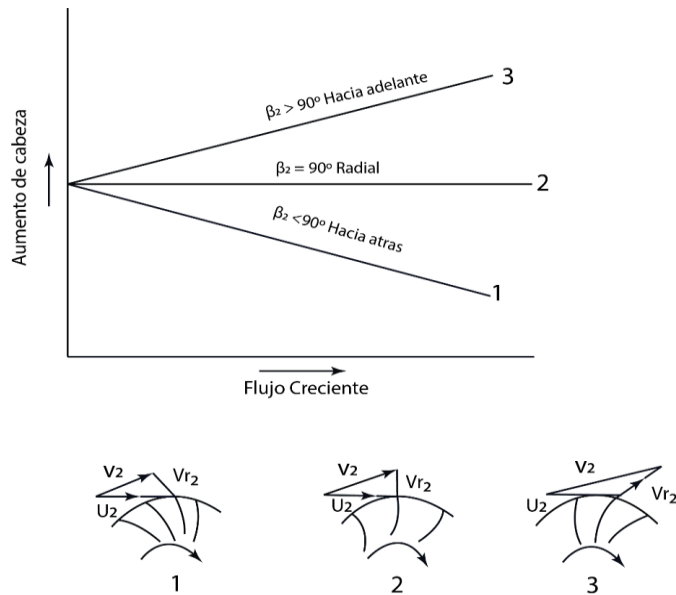


Figura 14-2: Diagrama que muestra las hojas curvadas hacia adelante, hacia atrás y hacia delante.

Fuente:(Brown, 2005).

2.13 Rendimiento del impulsor

En esta etapa se va a describir los aspectos del análisis del impulsor, en base a la compresión del fluido de trabajo a la entrada del impulsor que es una parte integral de la predicción del rendimiento. Las figuras 12-2 y 12-3 se muestran algunas de las características geométricas clave en las superficies de flujo meridional y media. El análisis del impulsor es recomendable realizarlo en el marco de referencia giratorio. A partir de las condiciones de flujo de entrada absolutas conocidas, en las siguientes ecuaciones, se define las velocidades relativas y la entalpia total en la entrada (Aungier, 2000).

$$W = \sqrt{W_m^2 + W_U^2} \quad (17)$$

$$R = h_t + wrC_U \quad (18)$$

$$h = h_t' - \frac{W^2}{2} = h_t - \frac{C^2}{2} \quad (19)$$

Donde:

W = Velocidad relativa

W_m = Velocidad relativa meridional(Aungier, 2000)

W_U = Velocidad relativa tangencial

h_t = entalpia termodinámica total

R = Rotalpia

La rototalpia es un parámetro básico que expresa la conservación de la energía en los alabes giratorios de los impulsores. Para ellos el análisis dinámico de compresores centrífugos requiere relaciones sistemáticas para el flujo, en el sistema estacionario y marco de referencia giratorio. La ecuación (17) proporciona la relación de la velocidad relativa total. Para calcular la entropía total, normalmente con un cambio isentrópico en el parámetro de interés, a partir de un valor estático (Aungier, 2000).

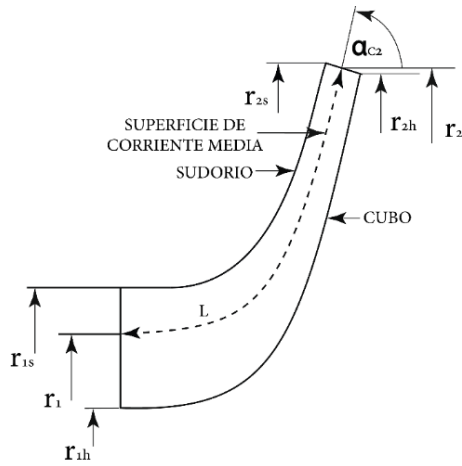


Figura 15-2: Geometría de paso del impulsor

Fuente: (Boyce, 2013)

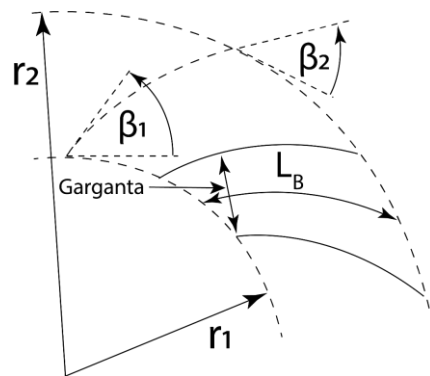


Figura 16-2: Geometría del alabe del impulsor

Fuente: (Dixon, 1988)

2.14 Factor de Deslizamiento

El factor de deslizamiento es un parámetro por considerar para el diseño de impulsores, para realizar un análisis correcto de la transferencia de energía entre el impulsor y el fluido. Si se considera en condiciones ideales, el flujo relativo que sale del impulsor recibe una guía casi que perfecta y se desliza por la superficie de los alabes (Dixon, 1988). El flujo a la salida del impulsor no está completamente guiado por los alabes, por lo tanto, el ángulo de la salida del fluido efectivo no es igual al ángulo de la salida de los alabes. Para tomar en cuenta la desviación del flujo en el impulsor se define el factor de deslizamiento como se puede observar en la figura 14-2 (Dixon, 1988).

$$\sigma = \frac{C_{\theta 2}}{C'_{\theta 2}} \quad (20)$$

Donde $C_{\theta 2}$ es el componente tangencial de la velocidad absoluta y está relacionada con el ángulo de flujo β_2 . La componente de velocidad tangencial hipotética $C'_{\theta 2}$ esta relacionada con el ángulo de la paleta β_2' (Dixon, 1988 y Aungier, 2000).

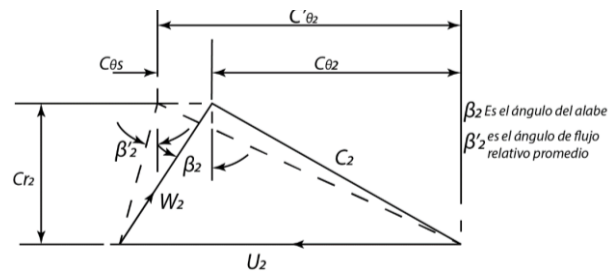


Figura 17-2: Diagramas de velocidad reales e hipotéticos a la salida de un impulsor con alabes barridos hacia atrás.

Fuente: (Dixon, 1988)

El fluido que ingresa al impulsor puede ser considerado como flujo irrotacional y sin fricción. Si el flujo absoluto entra en el impulsor sin giro, entonces el giro del flujo absoluto debe seguir de modo cero. Para ello se requiere un movimiento rotacional relativo en dirección opuesta al impulsor. Es por esta razón que el fluido no será perfectamente guiado por los alabes y tiene una velocidad angular de Ω , a esto se le conoce como remolino relativo (Dixon, 1988 y Aungier, 2000).

En la salida del impulsor, el flujo relativo puede considerarse como un flujo pasante sobre el que se superpone el remolino relativo. El efecto de estos dos movimientos es el flujo relativo promedio que emerge de los conductos del impulsor que está en un ángulo de los alabes y en dirección opuesta al movimiento del alabe, como se indica en la siguiente figura 2-15. Esta es la base de diversas teorías sobre el factor de deslizamiento (Dixon, 1988).

Como se indica en la figura 16-2 la velocidad de deslizamiento $C_{r2} = C'_{\theta 2} - C_{\theta 2}$, es considerada para ser el producto del remolino relativo y el radio $d/2$ de un círculo que se puede describir dentro de un canal, donde Ω es el ángulo entre la pendiente optimizada y la dirección axial. Por lo tanto $C_{\theta S} = \Omega d/2$. Si el número de paletas es denotado por Z , entonces una expresión

aproximada $d \cong (2\pi r_2/z)\cos(\beta'_2)$ entonces podemos escribir si z no es pequeño. Desde $\Omega = U_2/r_2$ entonces (Dixon, 1988).

$$C_{\theta s} = \frac{\pi U_2 \cos(\beta'_2)}{Z} \quad (21)$$

Como ahora $C'_{\theta 2} = U_2 - C_{r2}\tan(\beta'_2)$, el factor de deslizamiento se convierte en:

$$\sigma = \frac{C_{\theta 2}}{C'_{\theta 2}} = 1 - \frac{C_{\theta s}}{U_2 - C_{r2} \tan(\beta'_2)} \quad (22)$$

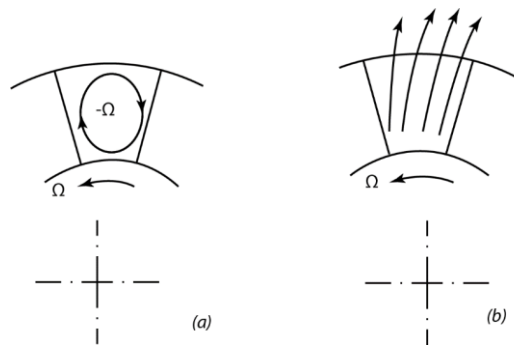


Figura 18-2: (a) Remolino relativo sin flujo continuo (b) Flujo relativo a la salida del impulsor

Fuente: (Dixon, 1988)

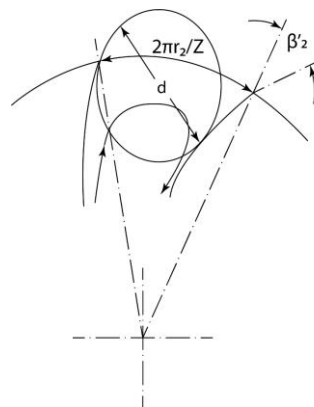


Figura 19-2: Modelo de flujo para el factor de deslizamiento Stodola

Fuente:(Dixon, 1988)

El factor de deslizamiento también es aplicado en caso especiales como el de alabes bidimensional curvados como espirales logarítmicas como se puede indicar en la siguiente figura 2-17 (Dixon, 1988).

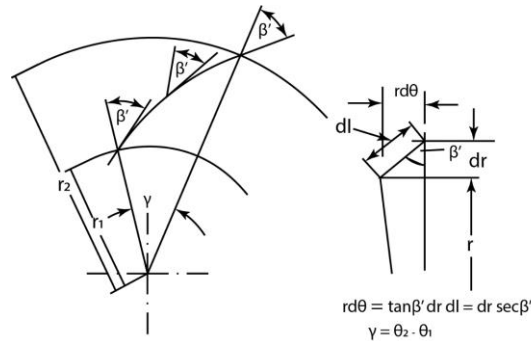


Figura 20-2: Espiral logarítmica. El ángulo β' del alabe es constante para todos los radios

Fuente:(Dixon, 1988 y Aungier, 2000)

La espiral logarítmica es la forma más simple del sistema de alabes radiales y también se utiliza con frecuencia para impulsores de bombas. El factor de deslizamiento para impulsores centrífugos es la siguiente ecuación (Dixon, 1988 y Aungier, 2000):

$$\sigma_B = (A - B\phi_2 \tan(\beta'_2))/(1 - \phi_2 \tan(\beta'_2)) \quad (23)$$

Donde A y B son funciones de r_2/r_1 . Mientras B sea una constante y aproximadamente igual a la unidad en todas las condiciones. De la misma manera para A que es independiente a la relación r_2/r_1 y depende del ángulo β'_2 y solamente. Los valores de A que se muestra en la figura 2.18, que también es posible interpretarse como el valor de B para el flujo cero a través de $\phi_2 = 0$ (Dixon, 1988 y Aungier, 2000).

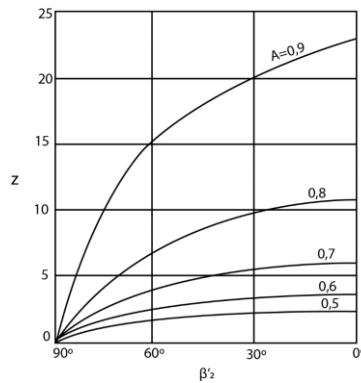


Figura 21-2: Factores de corrección del cabezal para impulsores centrífugos

Fuente: (Boyce, 2013)

2.14.1 Usos industriales del Control numérico computarizado (CNC)

Las aplicaciones industriales de las máquinas CNC se han basado principalmente en la eliminación de metal para crear la forma deseada. El metal se usa ampliamente para producir casi todo lo que vemos a nuestro alrededor, aunque estas cosas pueden no estar hechas de metal en sí mismas. Algunos de los productos más obvios que están hechos de metal son los automóviles. El bloque del motor y las piezas dentro de la transmisión se producen directamente a partir de una máquina CNC porque son necesarias tolerancias estrictas (una tolerancia es un rango en el dimensionamiento al que debe adherirse la máquina). Sin embargo, la mayoría de las partes de un automóvil no están fabricadas por una máquina CNC, pero tienen una conexión latente con una (Hood y Floyd, 2017).

Debido a que las máquinas CNC tienen una precisión muy alta y pueden proporcionar información a la computadora, también se utilizan en pruebas dimensionales. Si se fija un interruptor (sonda) a la ubicación de la herramienta, puede analizar las medidas de una pieza que se produjo. La máquina pasa esta sonda por toda la pieza para confirmar su forma y medidas deseadas (Hood y Floyd, 2017).

2.14.2 Tipos de máquinas CNC según su número de ejes.

Un torno CNC típico está diseñado con dos ejes estándar, un eje es el eje X y el otro eje es el eje Z. Ambos ejes son perpendiculares entre sí y representan los típicos movimientos de torno de dos ejes. El eje X también representa el recorrido transversal de la herramienta de corte, el eje Z

representa su movimiento longitudinal. Todas las variedades de herramientas de corte están montadas en una torreta (un almacén de herramientas especial) y pueden ser externas o internas. La torreta cargada con todas las herramientas de corte se mueve a lo largo de los ejes X y Z, lo que significa que todas las herramientas están en el área de trabajo (Smid, 2003; Hood y Floyd 2017).

Siguiendo los estándares establecidos de las fresadoras y centros de mecanizado, el único eje de la máquina capaz de realizar un agujero mediante métodos de taladrado, mandrinado, perforado o punzonado es el eje Z. En el trabajo con torno CNC, la orientación tradicional del eje para un tipo de torno horizontal es el movimiento hacia arriba y hacia abajo para el eje X, y el movimiento hacia la izquierda y hacia la derecha para el eje Z, cuando se mira desde la posición del maquinista (Smid, 2003).

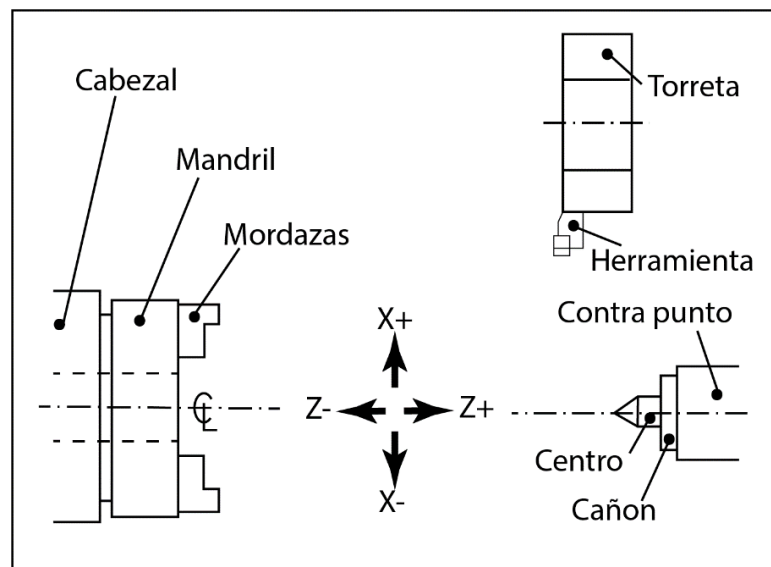


Figura 22-2: Configuración típica de un torno CNC de bancada inclinada de dos ejes - tipo trasero.

Fuente: (Smid, 2003)

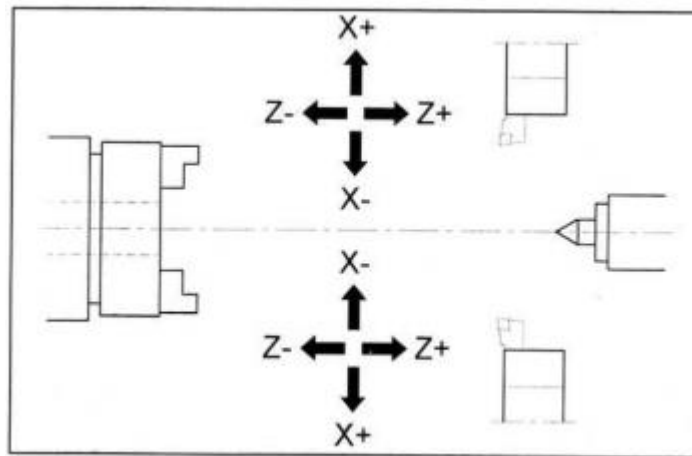


Figura 23-2: Configuración típica de un torno CNC con dos torretas.

Fuente:(Smid, 2003)

2.14.2.1 Torno de dos ejes

Este es el tipo más común de tornos CNC. El dispositivo de sujeción del trabajo, generalmente un portabrocas, está montado en el lado izquierdo de la máquina (como lo ve el operador). El tipo trasero, con cama inclinada, es el diseño más popular para trabajos generales. Para algunos trabajos especiales, por ejemplo, en la industria del petróleo (donde el giro de los extremos de los tubos es un trabajo común), una cama plana suele ser más adecuada. Las herramientas de corte se mantienen en una torreta de indexación especialmente diseñada que puede contener cuatro, seis, ocho, diez, doce y más herramientas. Muchos de estos tornos también tienen dos torretas (Smid, 2003).

2.14.2.2 Torno de tres ejes

El torno de tres ejes es esencialmente un torno de dos ejes con un eje adicional. Este eje tiene su propia designación, generalmente como eje C en modo absoluto (eje H en modo incremental), y es completamente programable. Normalmente, el tercer eje se utiliza para operaciones de fresado transversal, corte de ranuras, taladrado de orificios circulares de pernos, caras hexagonales, caras laterales, ranuras helicoidales, etc. Este eje puede reemplazar algunas operaciones simples en una fresadora, reduciendo el tiempo de configuración para el trabajo. Algunas limitaciones se aplican a muchos modelos, por ejemplo, las operaciones de fresado o taladrado pueden tener lugar solo en posiciones que se proyectan desde la línea central de la herramienta a la línea central del husillo

(dentro de un plano de mecanizado), aunque otras ofrecen ajustes descentrados (Smid, 2003; Gaja y Koreny, 2011).

El tercer eje tiene su propia fuente de energía, pero la potencia nominal es relativamente menor en comparación con la mayoría de los centros de mecanizado. Otra limitación puede ser el incremento más pequeño del tercer eje, particularmente en los primeros tornos de tres ejes. El incremento más pequeño de un grado es ciertamente más útil que un incremento de dos o cinco grados. Aún mejor es un incremento de 0.10, 0.010 y comúnmente 0.0010 en los últimos modelos. Normalmente los tornos de tres ejes ofrecen un incremento radial muy fino que permite un movimiento giratorio simultáneo. La nariz con valores de incremento bajos generalmente se diseña con un tope de husillo orientado solamente (Hood y Floyd, 2017).

2.14.2.3 Torno de cuatro ejes

Por diseño, un torno CNC de cuatro ejes es un concepto totalmente diferente al de un torno de tres ejes. De hecho, programar un torno de cuatro ejes no es más que programar tornos de dos ejes al mismo tiempo. Eso puede sonar extraño al principio, hasta que el principio de un torno CNC de cuatro ejes se vuelve más claro. En realidad, hay dos controles (y dos conjuntos de ejes), uno para cada par (conjunto) de ejes (Smid, 2003).

Solo un programa se puede utilizar para realizar el desbaste (OD) del diámetro exterior o exterior y otro programa para realizar el desbaste interior o interior (ID). Dado que un torno de cuatro ejes puede trabajar con cada par de ejes de forma independiente, el diámetro exterior y el diámetro interior se pueden mecanizar al mismo tiempo, realizando dos operaciones diferentes simultáneamente. Las claves principales para una programación exitosa de un torno de 4 ejes es la coordinación de las herramientas y sus operaciones, la sincronización de los movimientos de la herramienta y una generosa sensación de compromiso saludable (Smid, 2003).

2.14.2.4 Torno de cinco ejes

Los tornos CNC de cinco ejes son tornos especialmente diseñados con una torreta doble y un conjunto de tres ejes por torreta. Este diseño incorpora muchas estaciones de herramientas, muchas de ellas motorizadas, así como capacidades de mecanizado posterior. Programar estos tornos es similar a programar dos veces un torno de tres ejes. El sistema de control proporciona sincronización automáticamente, cuando es necesario. Un torno CNC de seis ejes de tamaño

pequeño a mediano es la elección popular de los talleres de máquinas de tornillos y las industrias con piezas pequeñas similares y aplicaciones de gran volumen (Smid, 2003).

El mecanizado de cinco ejes proporciona infinitas posibilidades en cuanto a los tamaños y formas de las piezas que usted puede procesar de manera eficaz. El término "cinco ejes" se refiere al número de direcciones en las que se puede mover la herramienta de corte. En un centro de mecanizado de cinco ejes, la herramienta de corte se mueve a través de los ejes lineales X, Y y Z, y gira sobre los ejes de rotación A y B para acceder a la pieza de trabajo desde cualquier dirección. En otras palabras, usted puede procesar las cinco caras de una pieza en un solo montaje. En una máquina CNC de cinco ejes, además del movimiento relativo entre pieza y herramienta en tres ejes, se puede controlar o bien el giro de la pieza sobre dos ejes, uno perpendicular al eje de la herramienta y otro paralelo a ella; o bien el giro de la pieza sobre un eje horizontal y la inclinación de la herramienta alrededor de un eje perpendicular al anterior (Acosta, 2017).

El equipo de control numérico se controla mediante un programa que utiliza números, letras y otros símbolos, por ejemplo, los llamados códigos G (movimientos y ciclos fijos) y M (funciones auxiliares), están codificados en un formato apropiado para definir un programa de instrucciones para el desarrollo de una tarea concreta. Cuando la tarea en cuestión varía se cambia el programa de instrucciones. La máquina opera a velocidades de corte y avance muy superiores a las máquinas convencionales por lo que se utilizan herramientas de metal duro para disminuir la fatiga de materiales (Acosta, 2017).

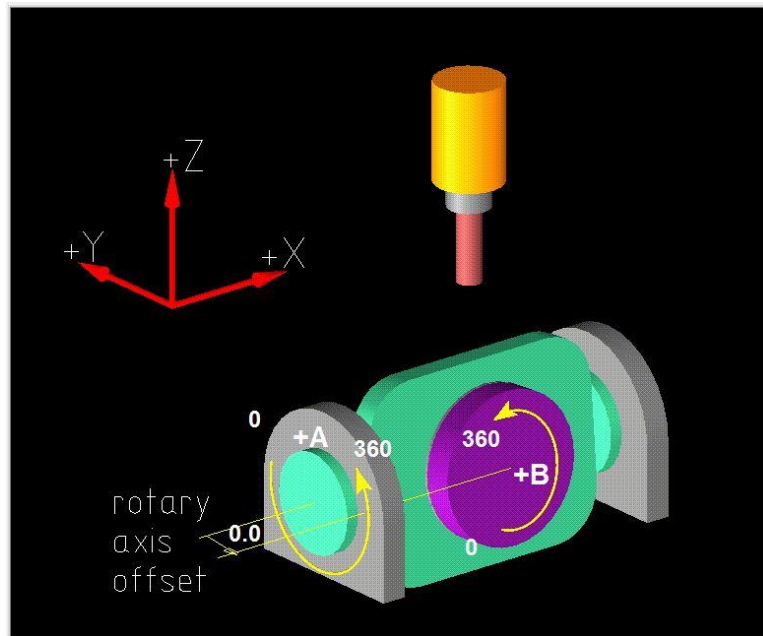


Figura 24-2: Notación de los ejes y dirección de movimiento de máquinas herramientas.

Realizado por: Acosta, C., Carrillo, D. 2020

En donde: X e Y: Movimientos principales de avance en el plano de trabajo principal.
 En donde: Z: Eje paralelo al eje principal de la máquina, perpendicular al plano principal
 U, V, W: Ejes auxiliares paralelos a X, Y, Z respectivamente.
 "A", "B", "C": Ejes rotativos sobre cada uno de los ejes "X", "Y", "Z"

2.14.3 Código G.

Todos los programas deben tener un nombre o un número que los pueda identificar, en ciertos casos hay programas solo aceptan números. Los programas CNC están compuestos por bloques sucesivos y cada uno identifica una instrucción para el control. El lenguaje de código G es un lenguaje de comando de máquina alfanumérico basado en ASCII que el controlador interpreta en movimientos y modos discretos. Este no es el tipo de lenguaje de programación que requiere que se compile antes de su uso. Sin embargo, debe adherirse a un sabor o dialecto específico que su controlador pueda interpretar y utilizar. Al configurar la salida de un paquete CAM, se le pedirá que seleccione un tipo específico de archivo de post-procesador de modo que el procesador de control comprenda completamente la salida del código G resultante (Overby, 2011; Acosta, 2017).

Por el contrario, si está escribiendo su propio archivo o emitiendo comandos directos a través de la interfaz de datos (MDI), el controlador debe comprender todas las entradas; de lo contrario, se producirá un error de sintaxis. El código G se considera el estándar de la industria para el lenguaje de control de máquinas herramienta y su sintaxis está adherida a un estándar conocido como RD-274. Hay un número finito de comandos básicos que son intrínsecos al lenguaje y, según el proveedor del software del controlador, puede haber más códigos o parámetros soportados por su implementación. Sin embargo, todos se ajustarán a la misma estructura de mando básica que se presenta aquí (Overby, 2011; Acosta, 2017).

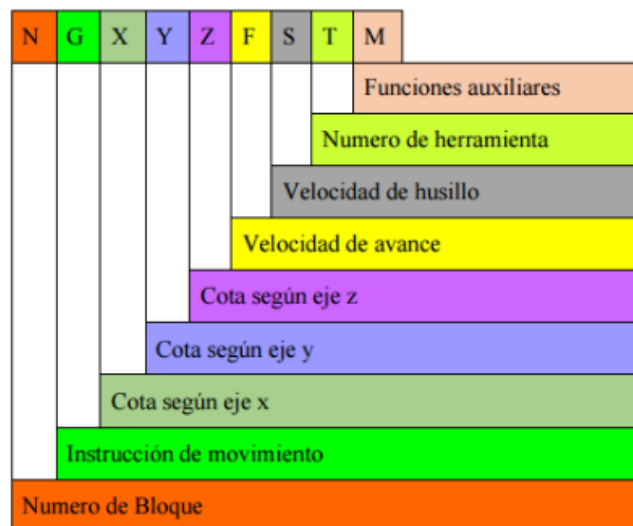


Figura 25-2: Estructura de un programa CNC.

Fuente: (Acosta, 2017)

Cabe señalar que hay una gran cantidad de usuarios de CNC que nunca se adentran en la programación manual o tienen los conocimientos más básicos de su sintaxis y uso. Es completamente posible confiar únicamente en la salida del código G de su post-procesador CAM para alimentar su programa de controlador. De esta manera, el usuario puede perder algunas funciones que ofrece el código G (por ejemplo, rutinas enlatadas). Sin embargo, es un método rápido y sencillo para producir la salida del código. También hay muchos otros usuarios que terminan guardando la salida del post-procesador y llaman al archivo manualmente a través de una rutina de archivo maestro de código G escrito a mano. Cualquiera de estos métodos, ya sea

individualmente o en combinación, se considera aceptable y depende del usuario individual y su nivel de comodidad (Overby, 2011).

CAPÍTULO III

3. MARCO METODOLÓGICO

Los softwares CAD/CAM son los encargados tanto del diseño, así como de la fabricación asistida de un computador los cuales son herramientas vitales para lograr una "fabricación ágil", donde las actividades de diseño y fabricación están estrechamente integradas para garantizar una rápida realización del producto. En particular, las características pueden mejorar el modelo de producto al permitir la agrupación de entidades geométricas y sus atributos, que pueden asociarse con el conocimiento de ingeniería utilizado en diversas aplicaciones. Esto tiene el potencial de mejorar el entorno de diseño y permitir la automatización de diversas tareas de ingeniería. Los sistemas CAD / CAM convencionales son esencialmente modelos geométricos sólidos o de superficie que no admiten funciones. Comprender CAD / CAM basado en funciones. Primero hay que estar familiarizado con los principios de los esquemas de modelado de curvas, superficies y sólidos. (Shah y Mäntylä, 1995).

El sistema que se ha propuesto realizar en este proyecto de titulación ha sido (CAD / CAE / CAM), debido a que utiliza tecnología avanzada de creación de prototipos para respaldar el diseño del producto desde el concepto hasta los diseños detallados y, en última instancia, la fabricación. Este enfoque de diseño electrónico emplea tecnología de creación de prototipos virtuales para respaldar a un equipo multifuncional en el análisis del rendimiento, la confiabilidad y los costos de fabricación del producto en las primeras etapas de la etapa de desarrollo del producto y en la realización de compensaciones cuantitativas para la toma de decisiones de diseño. Los prototipos físicos del diseño del producto se producen utilizando la técnica de creación rápida de prototipos principalmente para la verificación del diseño. El enfoque de e-Design tiene el potencial de acortar el ciclo general de desarrollo del producto, mejorar la calidad del producto y reducir el costo del producto (Chang, 2014).

3.1 Datos de la máquina.

En la Facultad de Mecánica, en el laboratorio de CAD CAM cuenta con una CNC 5 ejes de marca ROMI DCM 620-5X, que está al servicio para realizar el proceso de mecanizado de turbomáquinas como la referente a nuestro tema de investigación. Por lo que nos brinda una

reducción del tiempo de mecanizado, con movimientos simultáneos de los ejes requeridos según demande la aplicación

Tabla 1-3: Especificaciones técnicas de la máquina

Descripción	Unidad	Especificaciones
Cabeza		
Rotación máxima	rpm	12.000
Avances		
Avance eje rápido (ejes X, Y e Z)	m/min	36
Avance rápido (ejes B y C)	rpm	25
Avance de corte	mm/min	1 -20000
Cursos		
Eje – X	mm	620
Eje – Y	mm	520
Eje – Z	mm	460
Eje – B (inclinación)	-	-50° + 110°
Eje – C (rotación)	-	360°
Cambiador automático de herramienta		

Mandril de la herramienta	-	BT 40
Capacidad de herramienta	um	32
Diámetro máximo de la herramienta (sin herra. adyacente)	mm	Ø 76 (Ø 127)
Longitud máxima de la herramienta	mm	250
Peso máximo de la herramienta	kgf	7
Peso máximo	kgf	160
Datos E.E.		
Potencia del motor principal CA	kW	12/18
CNC modelo	-	Siemens 840D sl
Superficie mesa	mm	Ø 650
Peso admisible (uniformidad distribuida)	kg	300
Surco (lagrimas "T") (cantidad x ancho x distancia)	-	5 x 18 x 100

Fuente: (IBAMA - Manual do IUsuário - ROMI DCM 620- 5X 2007)

Realizado por: Acosta, C., Carrillo, D. 2020



Figura 26-3: Máquina ROMI DCM 620 5X

Fuente: (IBAMA - Manual do IUsuário - ROMI DCM 620- 5X 2007)

La máquina puede ser operada únicamente por personal entrando e instruido. Se recomienda antes de empezar la operación de mecanizado sea precalentada durante 10 a 20 minutos. Continuamente una prueba de pieza que opere el husillo principal en la mitad de su rango de velocidad mueva los ejes “X” y “Z” lentamente y opere todos los componentes.

3.2 Lenguaje ISO.

Para realizar el mecanizado a través de la máquina herramienta CNC, se debe tomar en cuenta las siguientes referencias:

- Se debe realizar la programación con un paquete CAM que integres los mandos interceptados por el CNC.
- El post-procesador realiza la lectura para adaptar al lenguaje CNC, se deben preparar herramientas a la pieza según la programación desarrollada.

3.3 Sistema de coordenadas.

Para trabajar en un sistema de referencia específico por el fabricante, que correspondas los sentidos de los movimientos de los vehículos, la posición del sistema de coordenadas depende de tipo de máquina los sistemas coordenados (X, Y e Z) son universales se familiariza para las CNC, sin embargo, en esta versión tiene los ejes integrados denominados EJE B y EJE C, que cumplen la función de rotación de la mesa de trabajo, tal que estos ejes son programados en grados.

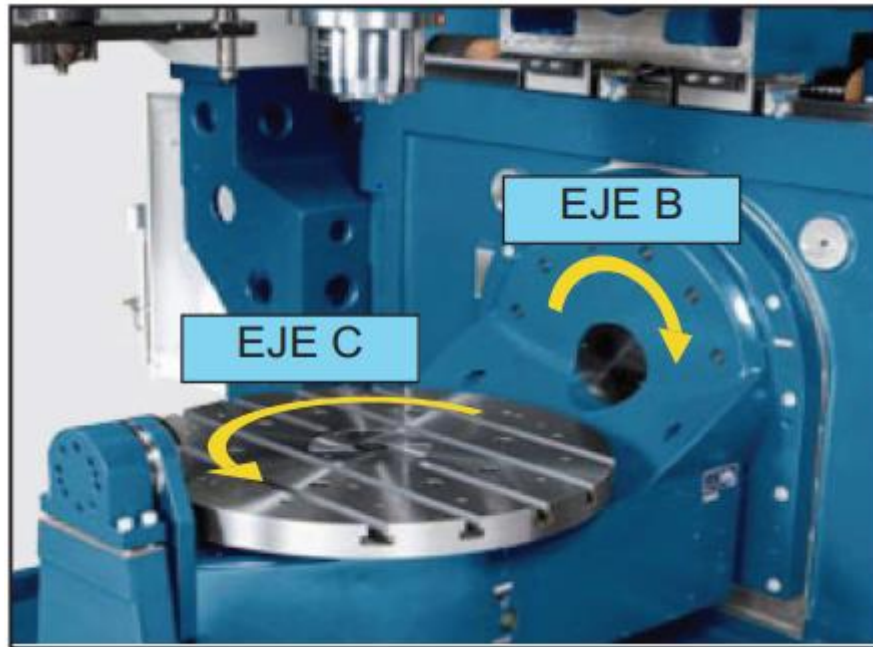


Figura 27-3: Sistemas de EJES B y C

Fuente: (Cfurbo, 2016)

El lenguaje de programación como con cero máquinas, cero piezas, cambio de herramienta, son estándares como para CNC 3 ejes, hay que aclarar que para 5 ejes se integran funciones específicas únicas para 5 ejes. Para esta aplicación se tiene un elevado grado de dificultad, en donde el mecanizado de ciertas trayectorias por medio de la sincronización de los 5 ejes. Con el fin de dar solución a la utilidad se necesita un software que cumpla con las especificaciones, siendo imprescindible la utilización de programas informáticos dedicados al desarrollo de esta como los siguientes mencionados:

- Siemens NX CAM
- HyperMILL

- TopSolid CAM
- BobCAD-CAM
- Entre otros...

3.4 Funciones específicas de la CNC 5 ejes.

La máquina CNC de 5 ejes posee grandes ventajas tales como la movilidad de esta en las distintas direcciones haciendo de este modo una máquina herramienta ideal para la fabricación de distintas piezas de trabajo con geometrías complejas para lo cual se ve necesario el conocimiento de las funciones de esta para la óptima operación de las piezas de trabajo antes mencionadas.

3.4.1 *Traori*

Esta función TRAORI (número de transformada, vector de orientación y correcciones de eje giratorio) trabaja en la aplicación de la industria espacial, moldes y matrices que necesitan familiarizarse con principios básicos de multiejes, debido a la organización de manera eficiente y proporciona a los programadores una idea de 5 ejes función de transformación TRAORI en el control CAD/CAM. Según su área de aplicación exige una amplia gama de funciones diferente como componentes de turbinas y del engranaje impulsor (IMPELLER / BLISKS). El controlador Siemens 840D si está equipado con potentes funciones avanzadas que cuando se utiliza de forma correcta, facilita considerablemente todo el proceso de mecanizado y programación de 5 ejes y así mismo tiempo mejora los resultados de producción.



Figura 28-3: Mecanizado CNC de 5 ejes mediante TRAORI

Fuente:(SIEMENS, 2009)

3.4.2 *Trafoof*

La función TRAFEOF cancela todas las transformaciones generadas por la función TRAORI, es indispensable esta función antes del cambio de cualquier herramienta

3.5 Simulación antes de mecanizar.

Tiene la ventaja de visualizar en monitor una representación gráfica de la ejecución del programa paso a paso, cambios de herramientas antes del mecanizado de la pieza en la máquina. De esta manera pueden controlar el resultado de la programación en forma sencilla.

3.6 Diseño del álabe del impulsor mediante Software CAD especializado.

En el software CAD se implementan funciones empíricas que permiten el cálculo de parámetros en base a la velocidad específica. Por lo que brinda la oportunidad de configurar parámetros de manera que se cree un diseño prometedor y realista del elemento obteniendo una buena eficiencia con un diseño particular. La consideración de las correlaciones empíricas también puede ser ventajosa al rediseñar a la inversa una geometría dada de un impulsor. Por lo tanto, se deben proporcionar los siguientes parámetros (Torres, 2012):

- Propiedades del fluido
- Flujo másico puntual
- Velocidad puntual
- Relación de presión puntual
- Dirección de rotación
- Condiciones de entrada
- Eficiencia de la carcasa para considerar pérdidas adicionales en estatores y voluta

3.6.1 *Toma de medidas del impeller.*

Para el diseño primero se deben tomar las medidas necesarias del impeller que se ha predispuesto a construir en este proyecto de investigación, tales como: Número de álabes, diámetro del cubo del inductor, diámetro de succión y ancho de salida.

Tabla 2-3: Dimensiones del impeller core cartridge para Chevrolet LUV
2.2/2.5

Denominación	Medidas
Número de álabes	12
Diámetro del cubo del inductor (dH)	23 mm
Diámetro succión (ds)	73 mm
Diámetro del impulsor (d2)	109 mm
Ancho de salida (b2)	5,05 mm

Realizado por: Acosta, C., Carrillo, D. 2020



Figura 29-3: Impeller core cartridge para Chevrolet LUV
2.2/2.5

Realizado por: Acosta, C., Carrillo, D. 2020



Figura 30-3: Vista superior del Impeller core cartridge para Chevrolet LUV 2.2/2.5

Realizado por: Acosta, C., Carrillo, D. 2020

3.6.2 *Cálculos de parámetros del turbocompresor.*

Una vez que se ha establecido los parámetros iniciales para el diseño del impeller se deben realizar los cálculos necesarios, con el fin de complementar la información necesaria para un adecuado diseño en el software CAD especializado en turbomáquinas, además de que con estos cálculos se podrá conseguir un óptimo rendimiento del impeller.

3.6.3 *Flujo másico.*

El flujo de másico, también conocido como transferencia de masa, es el movimiento de la materia. Se mide cuando se mueve a través de un límite determinado caracterizado por su área de sección transversal y una tasa de flujo. La cuantificación del flujo másico que pasa a través del compresor se obtiene de la ecuación de continuidad. Para esto, se monitorearon las variables: velocidad, temperatura y presión a la entrada de la zona de succión (Cengel, Cimbala and Sknarina 2006):

$$\dot{m} = c_1 A_1 \frac{P_{atm}}{R_p T_1} \quad (24)$$

Donde:

\dot{m} : *Flujo másico*

c_1 : *Velocidad de entrada al compresor*

A_1 : Área de entrada al compresor

P_{atm} : Presión atmosférica

R_p : Constante particular del aire

T_1 : Temperatura de entrada al compresor

n : Velocidad angular

$$A_1 = \frac{\pi}{4} (d_s^2 - d_H^2) \quad (25)$$

$$A_1 = \frac{\pi}{4} (73^2 - 23^2) \quad (26)$$

$$A_1 = 3,7699 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \quad (27)$$

$$n = 17000 \text{ rpm} \quad (28)$$

$$c_1 = V = R \cdot n \quad (29)$$

$$c_1 = V = \left(\frac{d_s}{2 \cdot 1000} \right) \cdot n \cdot \left(\frac{2\pi}{60} \right) \quad (30)$$

$$c_1 = V = \left(\frac{73 \text{ mm}}{2 \cdot 1000} \right) \cdot 17000 \text{ rpm} \cdot \left(\frac{2\pi}{60} \right) \quad (31)$$

$$c_1 = V = 64,9786 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (32)$$

TABLA A-2

Calores específicos de gas ideal de varios gases comunes

a) A 300 K

Gas	Fórmula	Constante de gas, R kJ/kg · K	c_p kJ/kg · K	c_v kJ/kg · K	k
Aire	—	0.2870	1.005	0.718	1.400
Argón	Ar	0.2081	0.5203	0.3122	1.667
Butano	C ₄ H ₁₀	0.1433	1.7164	1.5734	1.091
Dióxido de carbono	CO ₂	0.1889	0.846	0.657	1.289
Etano	C ₂ H ₆	0.2765	1.7662	1.4897	1.186
Etileno	C ₂ H ₄	0.2964	1.5482	1.2518	1.237
Helio	He	2.0769	5.1926	3.1156	1.667
Hidrógeno	H ₂	4.1240	14.307	10.183	1.405
Metano	CH ₄	0.5182	2.2537	1.7354	1.299
Monóxido de carbono	CO	0.2968	1.040	0.744	1.400
Neón	Ne	0.4119	1.0299	0.6179	1.667
Nitrógeno	N ₂	0.2968	1.039	0.743	1.400
Octano	C ₈ H ₁₈	0.0729	1.7113	1.6385	1.044
Oxígeno	O ₂	0.2598	0.918	0.658	1.395
Propano	C ₃ H ₈	0.1885	1.6794	1.4909	1.126
Vapor	H ₂ O	0.4615	1.8723	1.4108	1.327

Nota: La unidad kJ/kg · K es equivalente a kJ/kg · °C.

Fuente: *Chemical and Process Thermodynamics* 3a. ed., por Kyle, B.G., © 2000. Adaptado con permiso de Pearson Education, Inc., Upper Saddle River, Nueva Jersey.

Figura 31-3: Calores específicos de gases ideales.

Fuente: (López 2012)

$$R = 0,287 \frac{KJ}{kg \cdot K} \quad (33)$$

$$T = 27 \text{ °C} = 300 \text{ K} \quad (34)$$

$$P_{atm} = 101,325 \text{ Pa} \quad (35)$$

$$\dot{m} = 3,7699 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot 64,9786 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot \frac{101,325 \text{ Pa}}{0,287 \frac{KJ}{kg \cdot K} \cdot 300 \text{ K}} \quad (36)$$

$$\dot{m} = 0,2885 \frac{kg}{s} \quad (37)$$

En el de diseño del impeller para un turbocompresor, hay un cuadro combinado de modelo de propiedades de fluido, por lo que solo se debe dar o elegir la densidad del fluido de la base de datos, respectivamente.

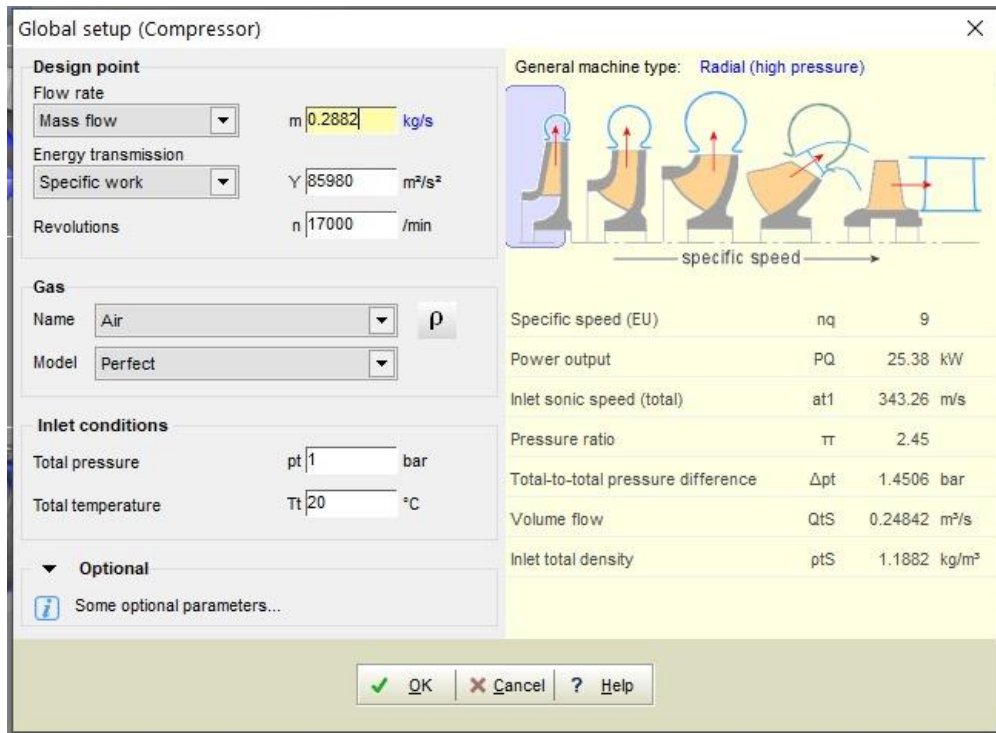


Figura 32-3: Configuración global del impeller.

Fuente: Software CAD especializado

Realizado por: Acosta, C., Carrillo, D. 2020.

Los parámetros de diseño se debe considera para la aplicación, el software CAD especializado nos da las ventajas para diseñar y modificar los parámetros del impeller, como anteriormente se especificó las medidas tomadas del impeller, el software CAD especializado nos da las posibilidades de ingresar los datos manual o de forma automática, en nuestro caso colocamos los datos de forma manual, para obtener una geometría como se obtiene del impeller en físico; como tenemos la otra opción de forma automática solo es necesario tener el diámetro del cubo del impeller y el software especifica los demás parámetros.

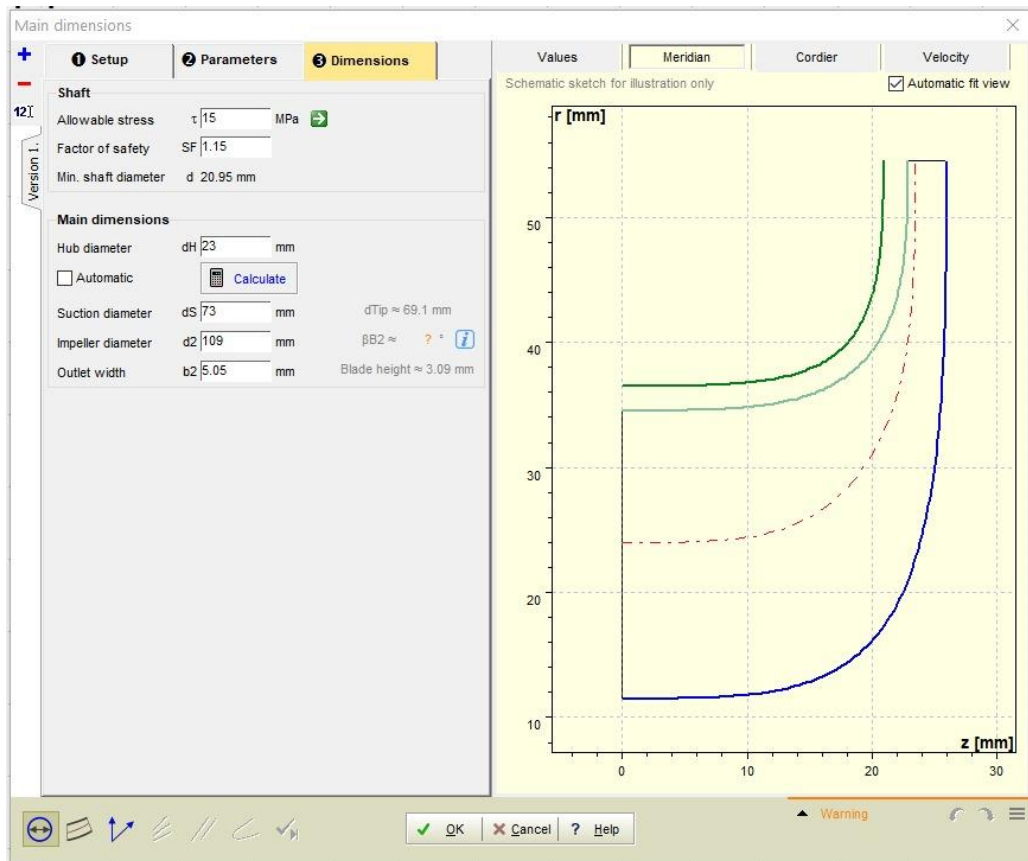


Figura 33-3: Dimensiones principales del impeller.

Fuente: Software CAD especializado

Realizado por: Acosta, C., Carrillo, D. 2020.

3.6.4 *Propiedades del álabe.*

Software CAD especializado posee una gran ventaja dado que las variables geométricas se pueden extraer de la geometría base de manera que puedan usarse directamente. Tales variables son, por ejemplo, radios, longitud axial, coordenadas meridionales y tangenciales, así como ángulos de pala a lo largo de líneas medias, con cuya ayuda se pueden diseñar superficies medias de los álabes.

Las superficies de flujo meridional curvadas espacialmente se mapean en un plano mediante esta transformación de coordenadas. Aquí t es el ángulo en dirección circunferencial mientras que m es la extensión meridional adimensional. Ambas cantidades se crean mediante la referencia de distancias absolutas en dirección meridional (M) y tangencial (T) al radio local r .

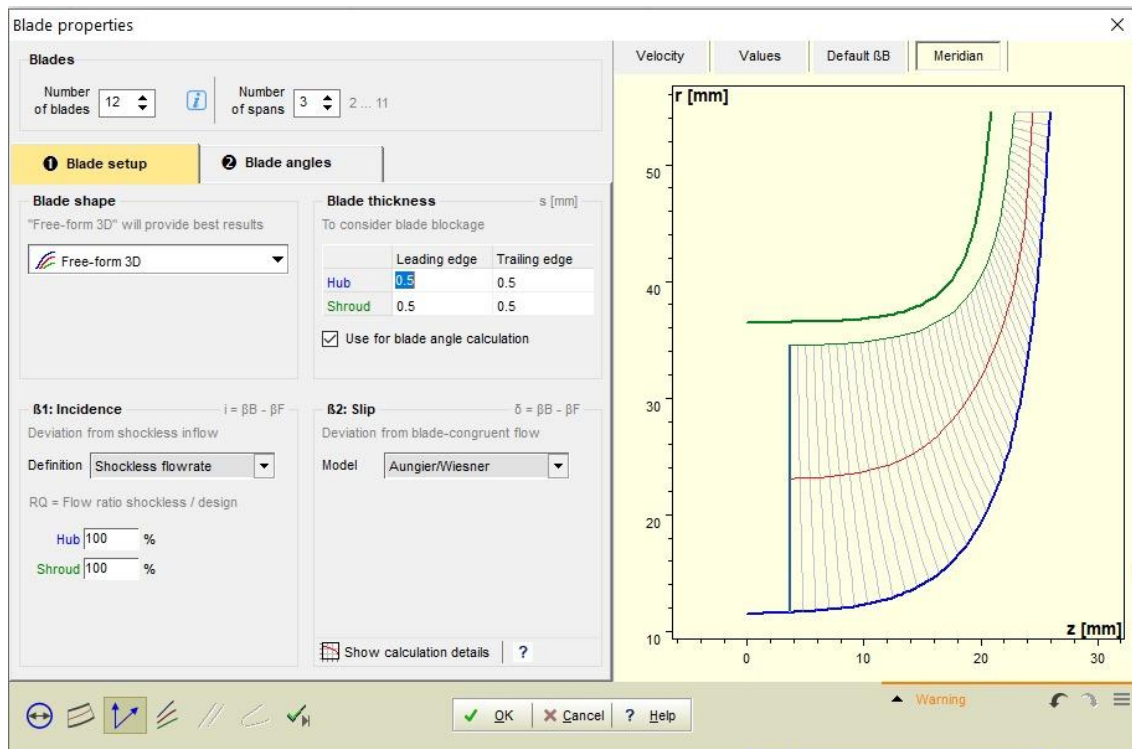


Figura 34-3: Propiedades del álab.

Fuente: Software CAD especializado

Realizado por: Acosta, C., Carrillo, D. 2020.

3.6.5 *Determinación de los ángulos de los álabes en el borde anterior y posterior*

Dentro de este paso de diseño, se deben determinar una serie de tramos, que se utilizan para diseñar, a medida que los ángulos del borde delantero y trasero del álabes en esos tramos. Más allá de esto, se debe dar una primera estimación del grosor de la hoja en el cubo y la cubierta. Estos valores pueden ajustarse iterativamente más adelante en el proceso del diseño inverso. Por lo tanto, por el momento, la definición del espesor se puede realizar sobre la base de los valores predeterminados de software CAD especializado. El cálculo de los ángulos de la hoja sobre esta base se logrará mediante el botón programable "Calcular β_B (Principal)". Cuando los datos se han extraído como se describe en el capítulo anterior, los ángulos de las palas se pueden tomar directamente desde allí.

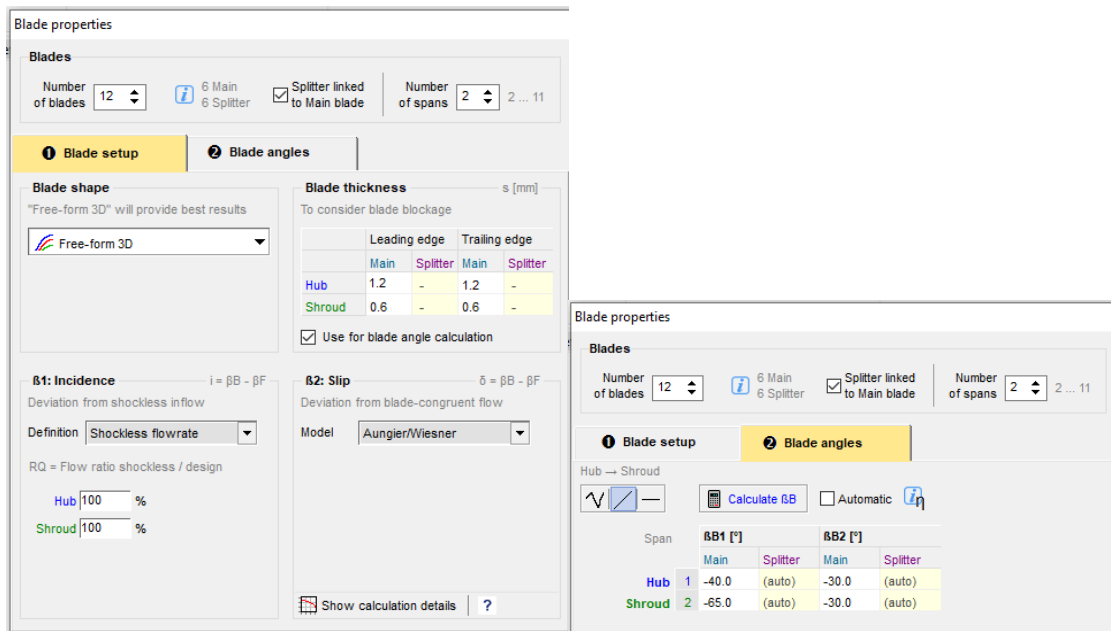


Figura 35-3: Configuración de propiedades de los álabes; número de álabes y sus ángulos

Fuente: Software CAD especializado

Realizado por: Acosta, C; Carrillo, D. 2020.

En el caso de 3D-blading, la opción "Free form 3D" debe elegirse en la sección "Blade Setup". Es conveniente diseñar en un pequeño número de tramos (líneas medias de la hoja), porque esto limitará el número de parámetros a ajustar. Por lo tanto, con el 3D-blading se debe intentar continuar con el diseño sobre la base de 3 tramos. Además, el número de álabes debe establecerse aquí para este diseño se ha tomado 12 álabes donde se dividen de la siguiente manera 6 álabes grandes y 6 de conducción que son los pequeños.

3.6.6 Líneas medias de los álabes principales

En el diseño inicial, las líneas medias también se pueden generar sobre la base del diseño predeterminado de software CAD especializado. Para ello, se debe abrir el cuadro de diálogo "Diseñar líneas medias de la hoja" y finalizar con OK. La superficie media producida aquí ahora es discernible. No quedará inicialmente en el centro de la paleta de la geometría del impulsor de referencia, lo que hará necesaria una rotación a la posición correcta.

Los datos m-t y los datos β -t extraídos para los diferentes tramos o secciones existen en forma de archivos de texto, estos deben cargarse por "Cargar polilínea adicional" en los diagramas

apropiados. Posteriormente, las curvas de Bézier deben ajustarse de manera que sean aproximadamente congruentes con las líneas m-t cargadas. El procedimiento es similar al diseño del contorno meridional.

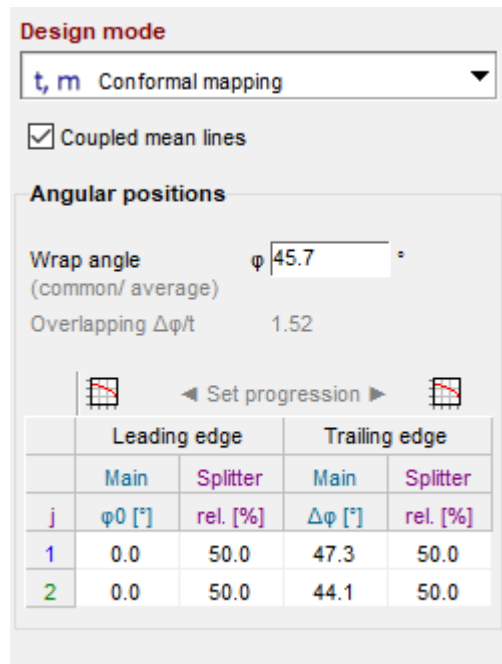


Figura 36-3: Modelo de diseño de los álabes para un conformado de mapeo

Fuente: Software CAD especializado

Realizado por: Acosta, C., Carrillo, D. 2020.

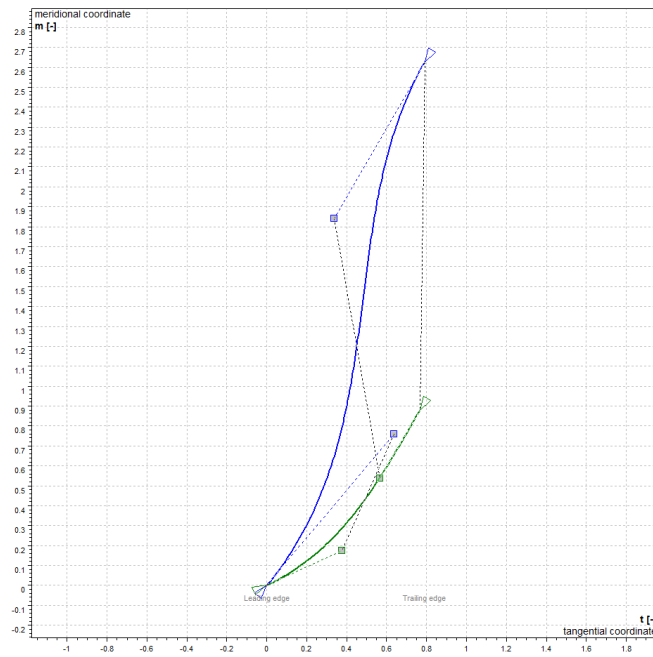


Figura 37-3: Mapeo conforme de la geometría del álabe principal y secundario.

Fuente: Software CAD especializado

Realizado por: Acosta, C., Carrillo, D. 2020.

En la figura anterior se puede observar cómo están representados los álabes siendo el principal el representado por la curva azul de Bezzier y el secundario o splitter por la curva verde.

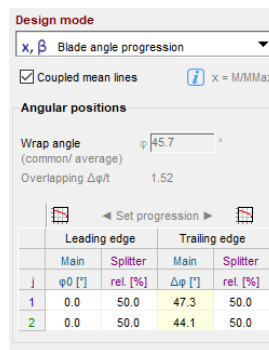


Figura 38-3: Modelo de diseño de los álabes; ángulo de progresión del álabe.

Fuente: Software CAD especializado

Realizado por: Acosta, C; Carrillo, D. 2020.

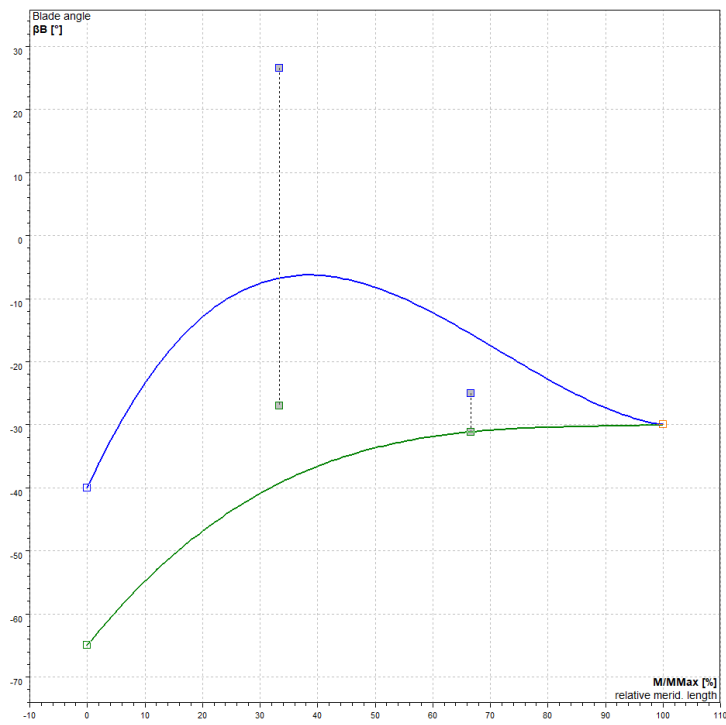


Figura 39-3: Ángulo de progresión del álabe principal y secundario.

Fuente: Software CAD especializado

Realizado por: Acosta, C., Carrillo, D. 2020.

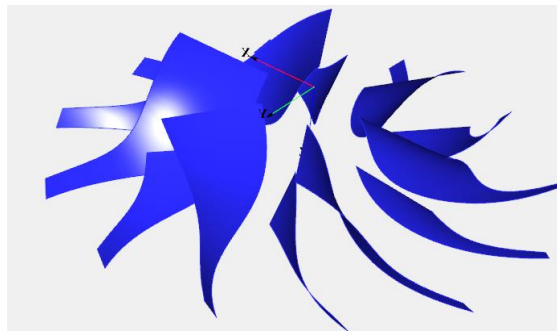


Figura 40-3: Modelado 3D de los álaves del impeller.

Fuente: Software CAD especializado

Realizado por: Acosta, C., Carrillo, D. 2020.

3.6.7 *Espesor del álabe.*

Conociendo el grosor del álabe en el borde delantero y trasero, así como en el borde superior del mismo y si el grosor es constante a lo largo de estos bordes, entonces el diseño del grosor en el borde superior se termina con un Entrada lo más exacta posible del espesor del álabe.

Generalmente, del álabe será más grueso en la raíz que en el borde superior y no tendrá una distribución de espesor simétrica en el lado de presión y de succión medido en la línea media. Por lo tanto, se deben realizar los siguientes ajustes en el paso de diseño "Perfiles del álabe ":

- Modo de diseño: forma libre (distribución de espesor a través de la curva de Bézier)
- Aumento del número de puntos Bézier
- Si es necesario, invalidación de la simetría del lado de presión y succión

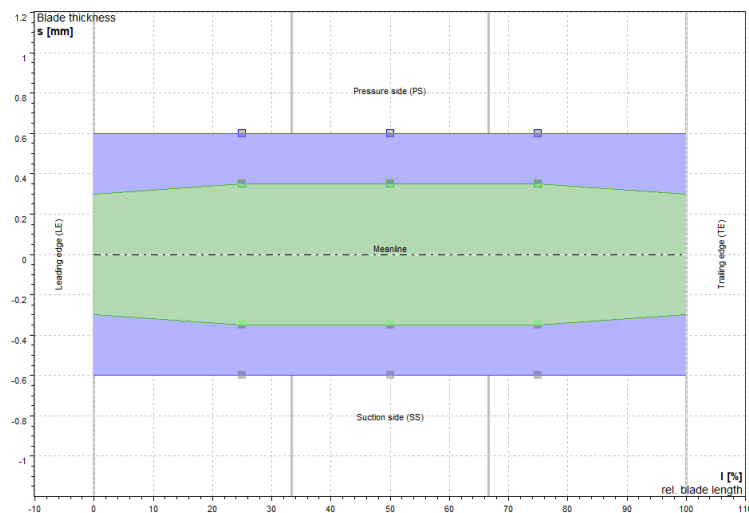


Figura 41-3: Espesor de los álabes del impeller.

Fuente: Software CAD especializado

Realizado por: Acosta, C., Carrillo, D. 2020.

Si los puntos Bézier, cuya posición debe cambiarse con la ayuda del mouse, se colocan uno sobre otro, aparece una caja de herramientas en la que se puede elegir el punto Bézier elegible. Más allá de esto, los puntos Bézier también pueden ser ajustados por la entrada directa de sus coordenadas.

Para ello, el cuadro de edición correspondiente debe abrirse con un clic derecho en el punto Bézier. Idealmente, la curva de Bézier debe aproximarse a una polilínea cargada como se muestra en el diseño del contorno meridional.

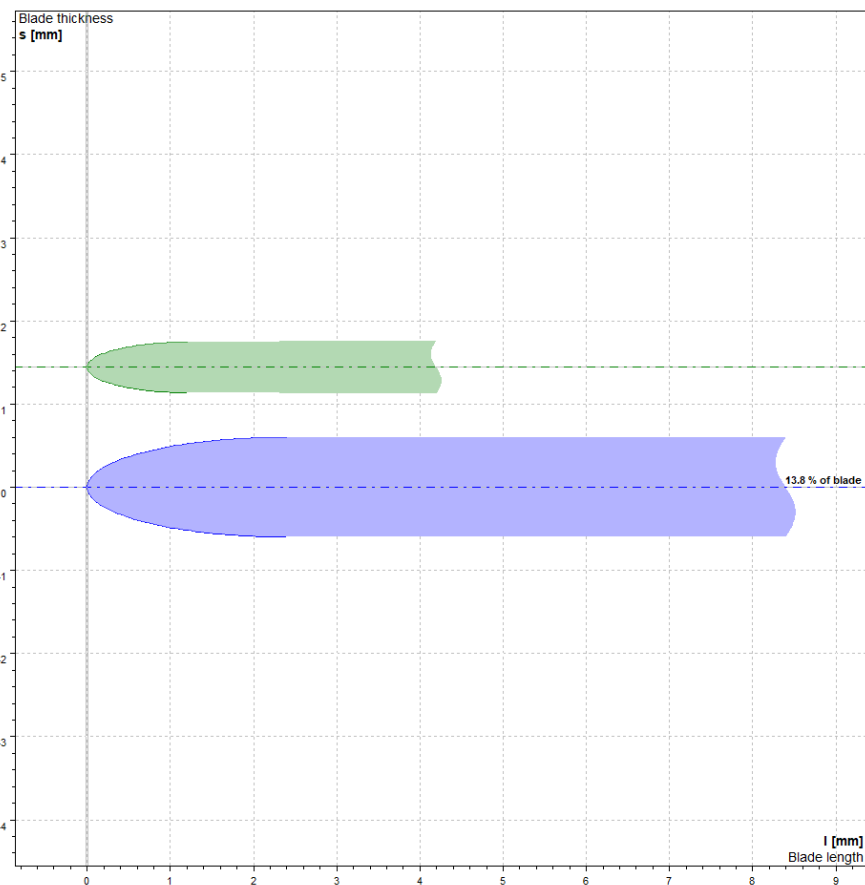


Figura 42-3: Espesor y longitud de los álabes principal y secundario.

Fuente: Software CAD especializado

Realizado por: Acosta, C., Carrillo, D. 2020.

3.6.8 Extensión CFD.

Para el diseño se va a utilizar junto con la interfaz ICEM del software CAD especializado, además, se debe definir una pequeña extensión de salida, ya que se utilizará para la generación de las interfaces rotor-estator. Basta con marcar la casilla correspondiente a tal fin.

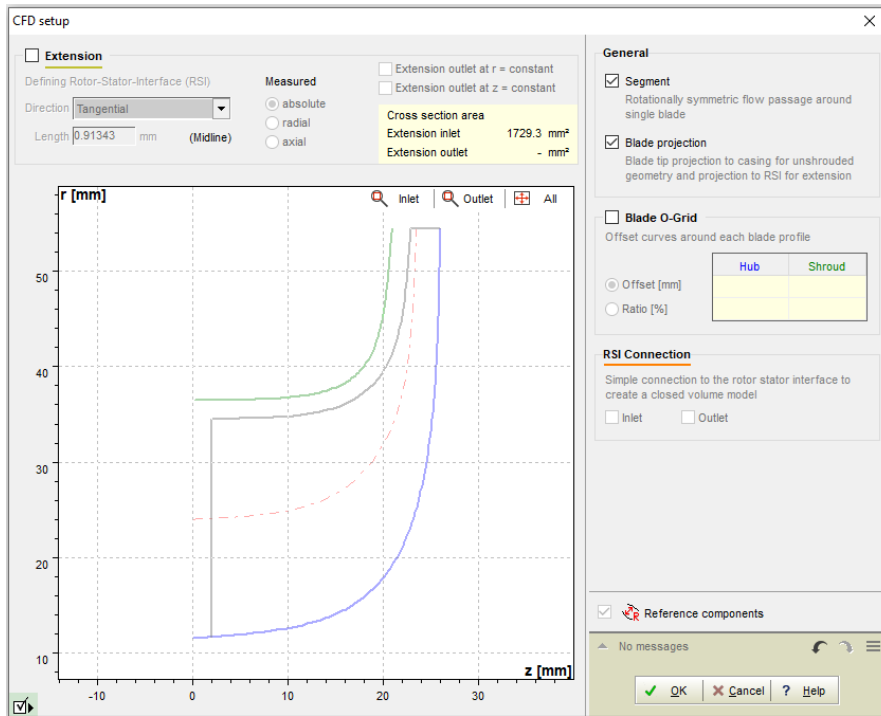


Figura 43-3: Extensión CFD de los álabes del impeller.

Fuente: Software CAD especializado

Realizado por: Acosta, C., Carrillo, D. 2020.

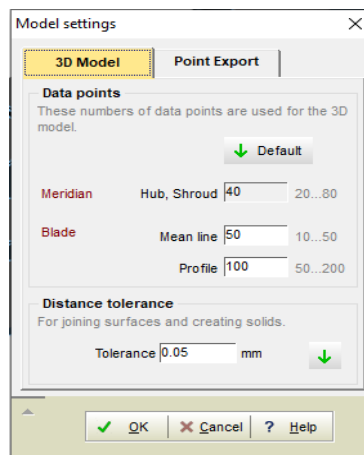


Figura 44-3: Ajustes de modelado para los álabes del impeller.

Fuente: Software CAD especializado

Realizado por: Acosta, C., Carrillo, D. 2020.

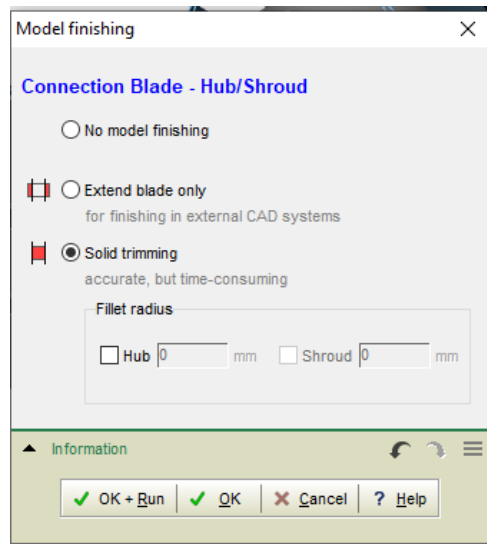


Figura 45-3: Acabado paramétrico del modelado de los álabes del impeller

Fuente: Software CAD especializado

Realizado por: Acosta, C., Carrillo, D. 2020.

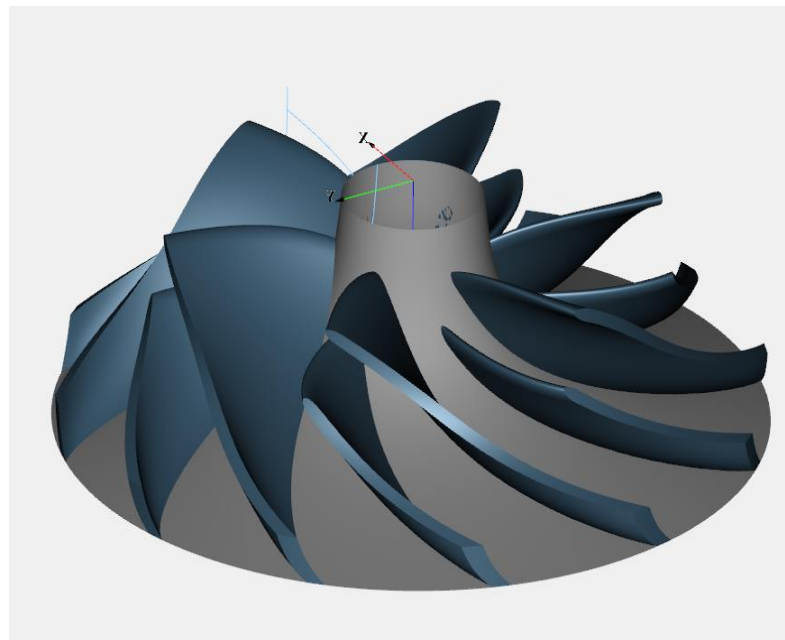


Figura 46-3: Vista 3D de los álabes principales y secundarios del impeller.

Fuente: Software CAD especializado

Realizado por: Acosta, C., Carrillo, D. 2020.

3.7 Simulación CAE

Para la simulación del impeller core cartridge para Chevrolet Luv 2.2/2.5 se ha llevado a cabo mediante el software ANSYS con la ayuda de un análisis CFX para determinar la trayectoria del fluido considerado como ideal dado que no se considera las pérdidas en el modelo. Los datos que se ingresaron fueron tomados mediante catálogos y medidas del modelo físico del impeller.

Tabla 3-3: Datos de trabajo y aerodinámica del impeller

Denominación	Medida
Rango de presión	1,4
Flujo másico	0,288 kg/s
Velocidad rotacional	25000 rpm
Temperatura	293 K
Presión	101325,932 Pa

Realizado por: Acosta, C; Carrillo, D. 2020.

3.7.1 Generación de la geometría

Conseguir la geometría para la simulación de flujo en CFX representa un gran desafío debido a la complicación de los perfiles de los álabes en el impulsor del compresor y que necesariamente es de donde da inicio el trabajo. Actualmente se dispone de conjunto de técnicas tecnológicas de punta para el perfeccionamiento de investigaciones de este medio y, es gracias a esto que la mejor elección considerada luego de revisar minuciosamente las técnicas usadas por varios investigadores en diferentes trabajos, fue la de realizar la geometría antes mencionada mediante la herramienta que nos proporciona el software ANSYS como es la opción Bladegen el cual es una guía práctica para la construcción de este tipo de impulsores semiabiertos.

3.7.2 Bladegen

Bladegen es una herramienta de ANSYS la cual crea automáticamente bocetos del álabe meridional para los contornos de la ruta de flujo principal (cubo, cubierta, etc.) y un cubo simple.

El boceto del cubo se puede modificar y dimensionar según se desee utilizando el esbozo DesignModeler, en este caso se lo va a realizar para un impulsor semiabierto del compresor.

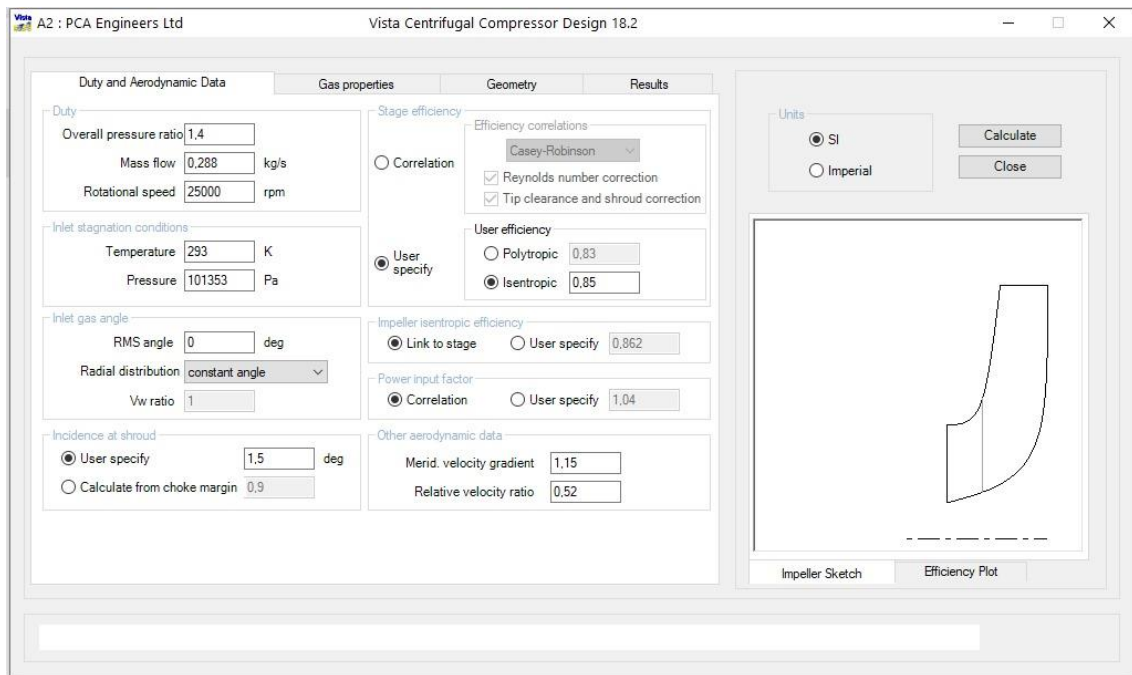


Figura 47-3: Datos de trabajo DesignModeler

Fuente: ANSYS

Realizado por: Acosta, C., Carrillo, D. 2020.

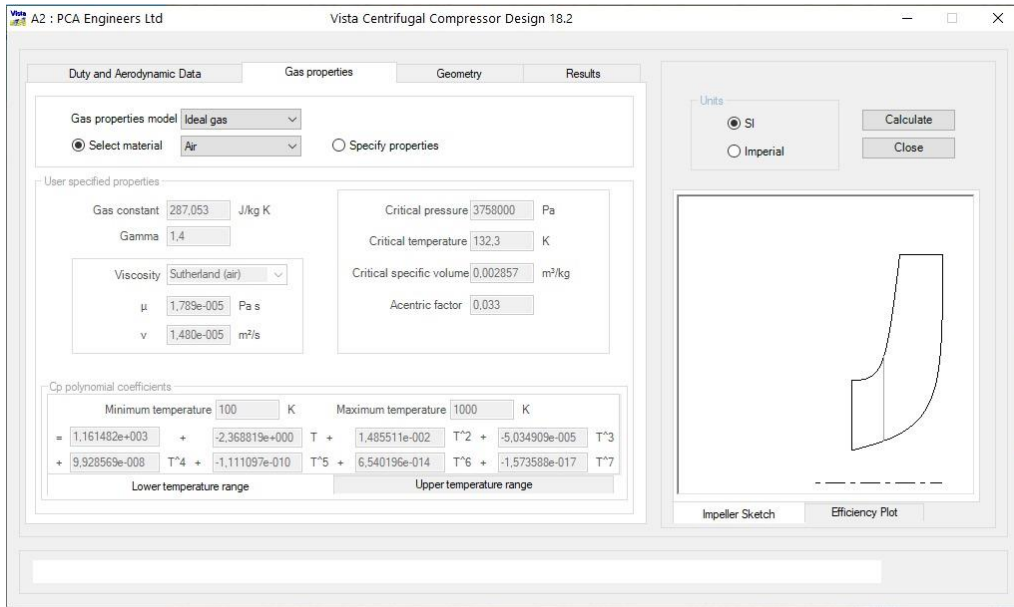


Figura 48-3: Propiedades del gas ideal aire Design Modeler

Fuente: ANSYS

Realizado por: Acosta, C., Carrillo, D. 2020.

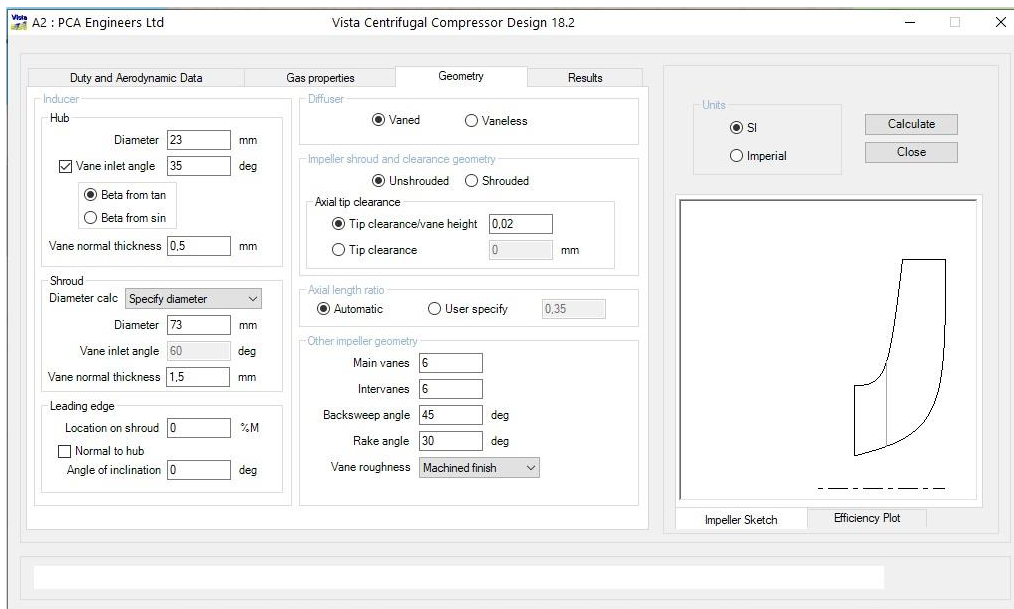


Figura 49-3: Configuración de geometría del impeller Design Modeler

Fuente: ANSYS

Realizado por: Acosta, C., Carrillo, D. 2020.

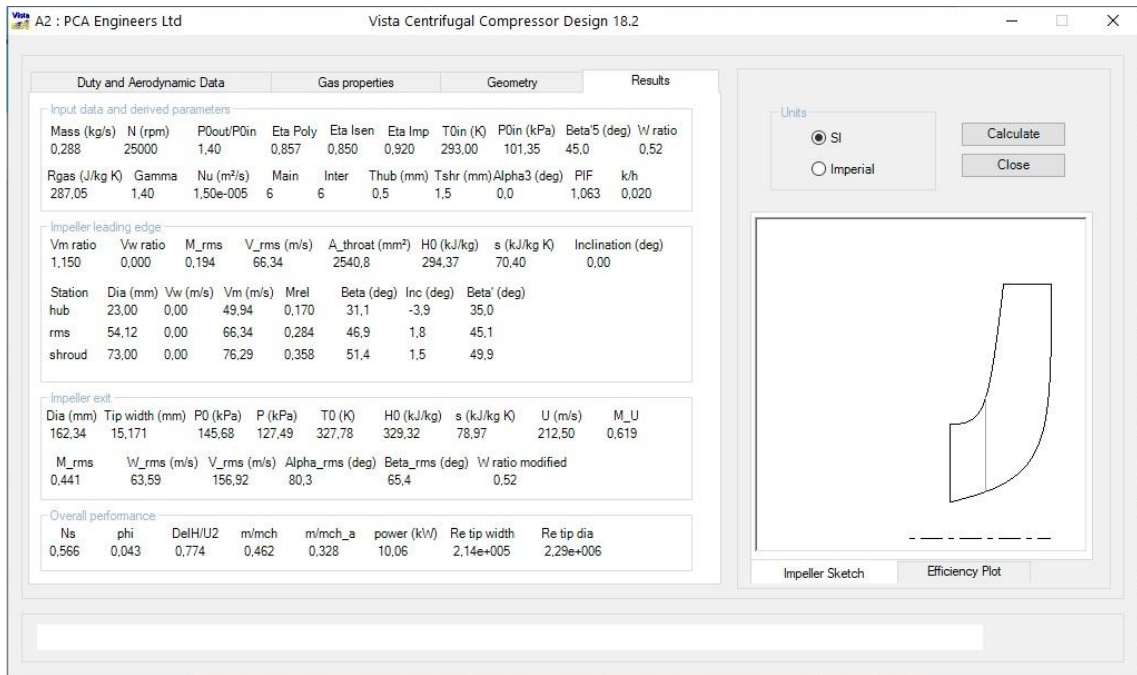


Figura 50-3: Resultados paramétricos del impeller Design Modeler

Fuente: ANSYS.

Realizado por: Acosta, C., Carrillo, D. 2020.

3.7.3 *Modificar las curvas spline del impeller*

Cuando se crea inicialmente una spline, se define de forma única por sus puntos de ajuste. Los puntos de control de spline (si se exponen mediante la opción cuando se crea el spline o mediante la edición de spline) se pueden modificar mediante la operación de arrastre normal. Es recomendable que utilice puntos de control en lugar de puntos de ajuste al manipular las curvas a conveniencia de la geometría para la creación de los álabes del impeller. En la sección anterior se puede visualizar que establecen ciertos parámetros de entrada del fluido, para generar el perfil meridional del impeller de una forma predeterminada donde se establece las condiciones geométricas del impeller. En la sección “ANSYS Blade Desing” el perfil meridional se puede modificar para establecer los parámetros de nuestro prototipo de impeller para tener referencia de las dimensiones de un impeller real, ajustando el diámetro del Hub y Shroud, y así mismo el el diámetro del difusor de salida del impeller.

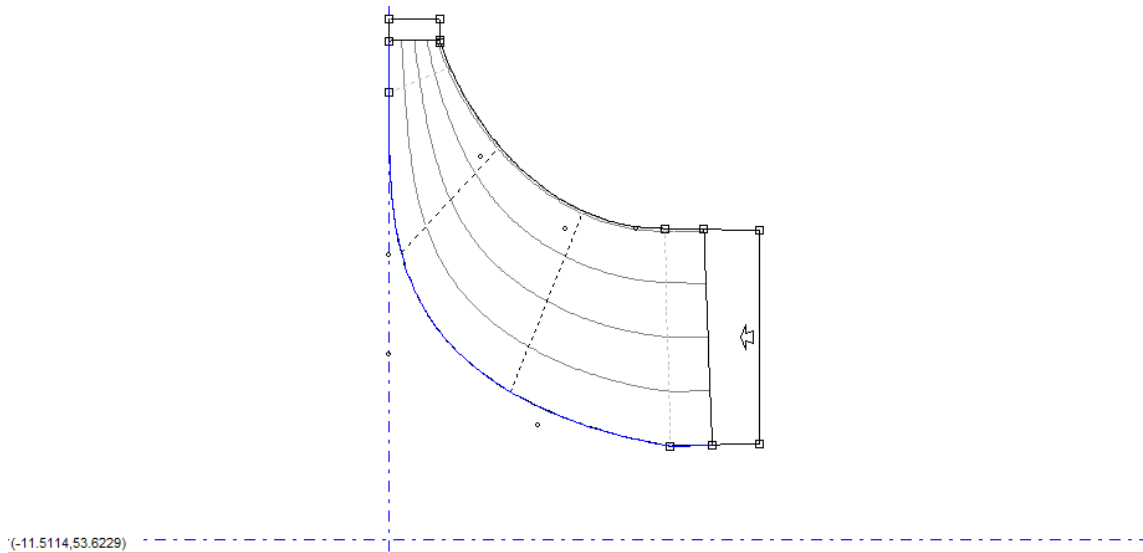
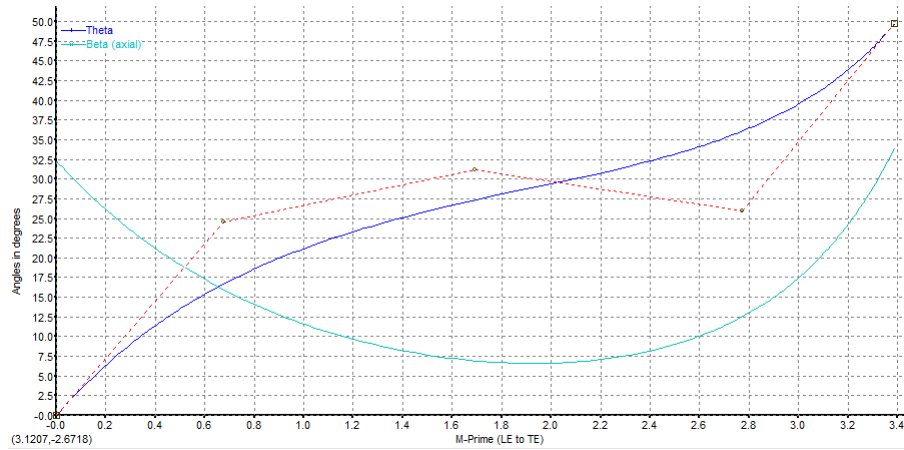


Figura 51-3: Configuración de curvas spline del impeller

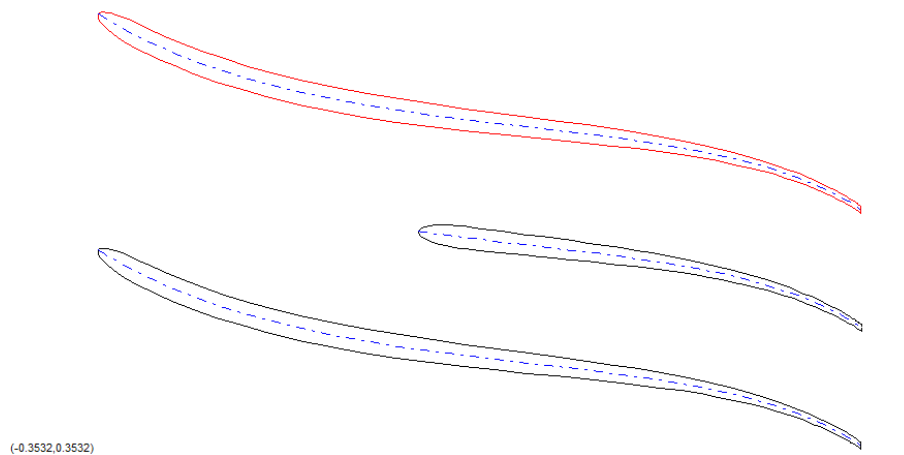
Fuente: ANSYS.

Realizado por: Acosta, C., Carrillo, D. 2020.

Los ángulos de entrada y salida del impeller aportan una función importante en la inclinación de los alabes, para ellos en esta sección hay la posibilidad de modificar la inclinación y observar en el rodete en 3D para tener una mejor visualización de esta, y la discrepancia que se presenta entre alabe y alabe. Es por ello que no se puede tener una geometría al 100 % similar a la geometría en física como disponemos, para ello se realizó un análisis visual con el fin de obtener una geometría, con las características que sería nuestro análisis de estudio. Como se visualiza en (a) podemos ajustar la curva del spline con el fin de obtener un mayor ajuste, la curva spline theta puede reducir o aumentar la zona inicial de succión, mientras que la curva spline Theta y Beta modifican la zona de presión de los alabes principales como se puede observar en (b) en las caras entre alabes y alabes.



(a)



(b)

Figura 52-3: Ángulos de entrada y salida del Impeller β y θ .

Fuente: ANSYS.

Realizado por: Acosta, C., Carrillo, D. 2020.

La creación del modelo 3D mediante “ANSYS Blade Desing” nos genera la geometría del impeller, por la cual ya tenemos una referencia para poder realizar el mallado del impeller para tener una mayor precisión en los análisis de estudio. Así mismo como se observar en la figura tanto la entra de los alabes como de los spline deben ser de forma elíptica.

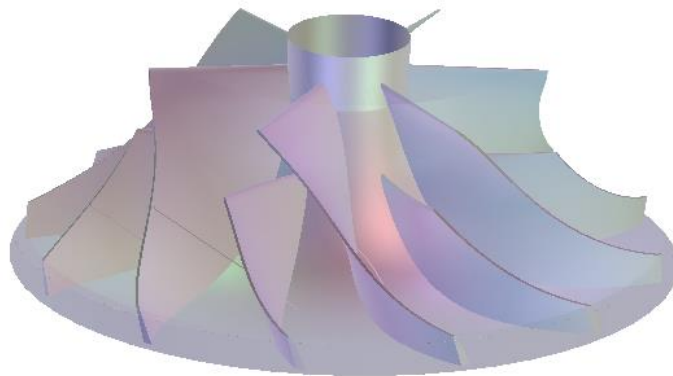


Figura 53-3: Visualización en modelado 3D del impeller

Fuente: ANSYS.

Realizado por: Acosta, C., Carrillo, D. 2020.

3.7.4 *Mallado de un turbo compresor*

Una vez obtenida la geometría del impeller, el software ANSYS cuenta con una herramienta de mallado específicamente para este tipo de turbomáquinas para realizar análisis CDF (Dinámica de fluido computacional), dicha herramienta que nos brinda esta solución es ANSYS TurboGrid.

3.7.5 *Mallado con Turbo Mesh*

Una vez en la plataforma de TurboGrid, hay que tener en cuenta que es herramienta para mallado de turbomáquinas, en nuestro caso debemos especificar los parámetros de entrada que se refiere a un impulsor centrifugo, también la topología, como la calidad de la malla. Una vez establecido que se refiere a un impulsor centrifugo el mallado puede ser automático, como también especificar cierto método que se puede realizar para un mayor refinamiento de la malla, hay que tener en cuenta que si se realiza un mayor refinamiento de malla no siempre es la mejor solución, dependiendo la aplicación que se realice, una desventaja de un mayor refinamiento es el gasto computacional. Como en otros tipos de mallado tradicional se tiene un criterio para la calidad del mallado como es “Jacobian Ration” que se puede decir de una excelente calidad de malla oscila en el intervalo de [0,95 – 1,05].

3.7.6 *Topología*

La topología consiste en una configuración de bloques que actúa como una referencia para posicionar los elementos de mallas. La topología influye directamente en la generación del

mallado, como la calidad de la malla. La topología “ATM Optimized Topology” genera un patrón regular de elementos Hexaédricos (hex). Una vez que se genere el mallado de forma automática “ATM Optimized Topology” calcula la topología maestra y el mallado refinado, para ellos los alabes como los alabes divisores debes ser deben los borden redondeados en la zona de ataque.

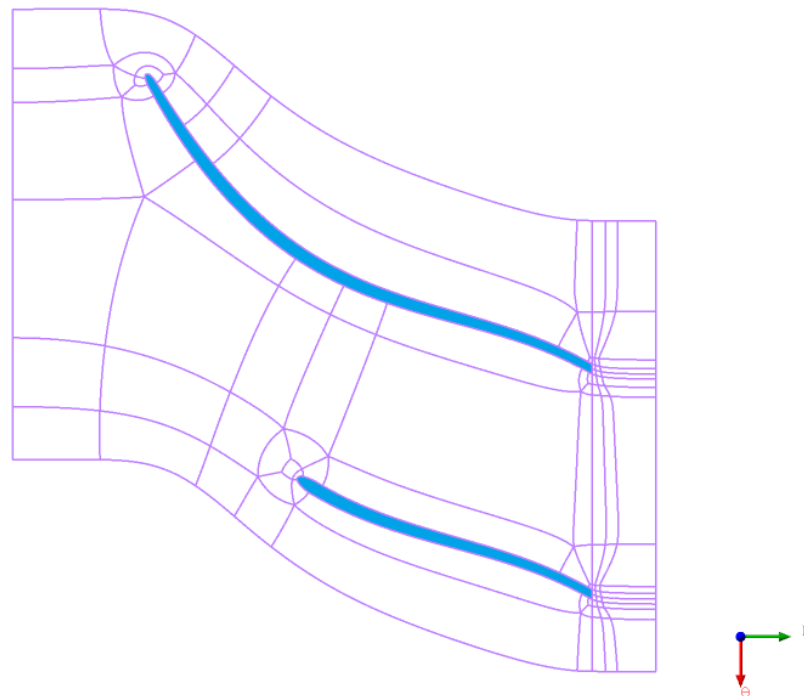


Figura 54-3: Topología ATM Optimized Topology 2D para alabe principal y álabes divisor.

Fuente: ANSYS.

Realizado por: Acosta, C; Carrillo, D. 2020.

3.7.7 *Mesh Data*

Mesh Data también posee su propio refinador de mallado, para este caso se puede configurar una vez que se haya establecido la topología. Además, cuenta con la configuración que afecta de forma global a la turbomáquina, para establecer los refinamientos mesh data cuenta con los métodos que permiten refinar el mallado los cuales se establecen a continuación.

3.7.7.1 *Target Passage Mesh Size*

Este método consiste en establecer un número limitado de nodos en el mallado, para dar una mejor calidad cuenta con tres criterios, grueso (20000), medio (100000) y fino (250000) si se establecen estos parámetros el software ajustara el refinamiento en zonas locales de mayor incidencia.

3.7.7.2 *Global Size Factor.*

Este método realiza un análisis global que define el tamaño total del mallado. Para un mayor definimiento se puede modificar el factor de tamaño que se encuentra en el intervalo de 1-5, pero se debe tener en cuenta que no el tamaño de la malla no es lineal.

3.7.8 *3D Mesh*

En esta sección se genera el mallado, muestra la superficie del mallado, pero por donde fluye el fluido. No hay que confundirse TurboGrid no malla el sólido, sino por donde va a transitar el fluido a ciertas revoluciones, que esos parámetros no se especifican en esta sección a continuación se puede visualizar le geometría mallada, pero de una forma esquemática se muestra todos el impeller, pero un dato importante TurboGrid como mallas un alaba principal y un divisor, para que el impulsor se represente en ANSYS CFX de una forma completa de debe transformar todo el impeller.

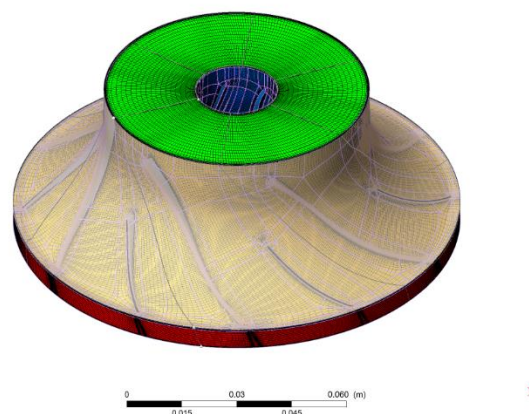


Figura 55-3: Mallado del Impeller

Fuente: ANSYS.

Realizado por: Acosta, C., Carrillo, D. 2020.

3.7.8.1 *Análisis de flujo del Impeller “ANSYS CFX”*

La herramienta ANSYS CFX cuenta con un modo de turbomáquinas que es óptimo para realizar análisis CDF, la geometría del dominio del fluido se importa del TurboGrid al banco CFX, ANSYS CFX resuelve el análisis de turbulencia, viscosidad, compresible y completamente el fluido 3D del flujo del fluido (aire). La presión y la temperatura totales se establecen en las condiciones de los límites de entrada. En la salida, las condiciones límites de presión estática para un flujo masico mayor son establecido, para flujo masico más bajo se establecen las condiciones de límite de flujo masico, también ajusta la velocidad del impeller y la dirección de rotación de esta.

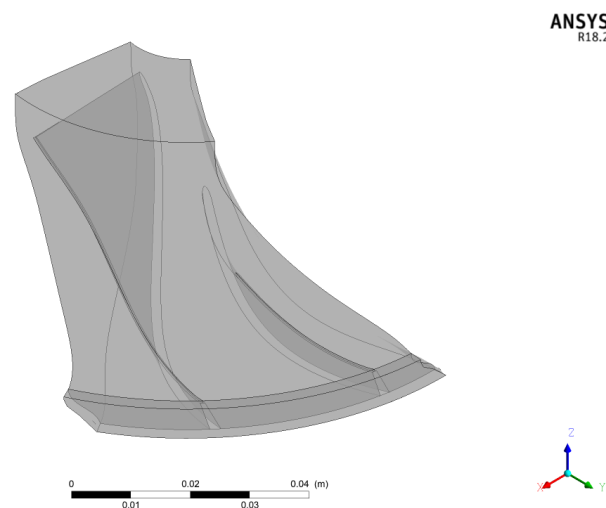


Figura 56-3: Geometría de análisis CFX

Fuente: ANSYS.

Realizado por: Acosta, C., Carrillo, D. 2020.

3.7.8.2 *Condiciones de Entrada.*

En la entrada, el límite se define como una entrada subsónica, con la temperatura ambiente, la presión total y los perfiles de dirección de flujo. El nivel de turbulencia se define como intensidad media, por los niveles de turbulencia desconocidos. La pala, el cubo y la cubierta se define como paredes adiabáticas con la velocidad de rotación adecuada. Como la presión estática.

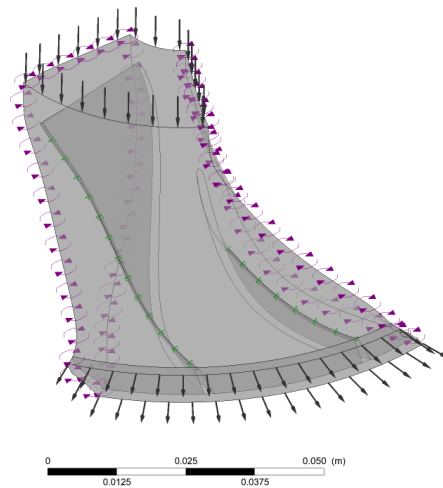


Figura 57-3: Condiciones de contorno de entrada del impulsor, simulación

Fuente: ANSYS.

Realizado por: Acosta, C., Carrillo, D. 2020.

Una vez establecida las condiciones de entrada del impulsor se establecen el número de interacción para el análisis, cabe recordar que ANSYS CFX solo analiza la transición del flujo, en nuestro caso se estableció el fluido al aire.

3.8 Manufactura del impeller CAM.

El proceso de manufactura de estructuras complejas como el impeller son diseñadas para una transformación óptima de flujo, para la manufactura de estas turbomáquinas se puede hacer mediante CNC 5 ejes de manera secuencial que nos brinda una accesibilidad de la herramienta de corte. El software NX Siemens es una de las empresas reconocida con tecnología avanzada de máquinas CNC, el software NX Siemens combina el diseño y la fabricación de piezas mecánicas como impeller/ blisk que aprovechan el fresado turbomáquinas. Esta aplicación te permite ahorrar tiempo definiendo operaciones de mecanizado para una sección del Blisk/impeller y luego completando automáticamente el resto de las partes.

3.8.1 Selección del material

Los impeller son turbomáquinas son empleadas en diferentes campos y dependiendo su aplicación se debe seleccionar el material, son elegidos principalmente para soportar condiciones

ambientales, en el caso de las máquinas térmicas estas están expuestas a altas temperaturas, gases corrosivos, vibraciones y esfuerzos mecánicos debido a la fuerza centrífuga que ejercen en la operación, hay que tener en cuenta que ciertos materiales presentan propiedades excelentes para emplear su reto es la fabricación. Para nuestro caso como es estudio es el impeller.

El impeller se debe seleccionar de un material que sea ligero y rígido por lo que es una turbomáquina que no está expuesta a altos cambios de temperatura, en el estudio del prototipo de un impeller para un turbocompresor el material más adecuado es la aleación de aluminio por sus óptimas propiedades de trabajo como para el mecanizado. Para turbomáquinas como turbinas a reacción, de vapor y gas se emplean diferentes tipos de aleaciones como: aleaciones de acero debido al aumento de temperatura, según su incremento de presión de los gases se emplea acero inoxidable austenítico y aleaciones en base de níquel. En la actualidad se está reemplazando por aleaciones de titanio debido a que presenta buenas condiciones. “Esto debido al abaratamiento de los costos de fabricación y de conformado (Ti-6-4, Ti-811, Ti-6242S) (Castillo 2016)”

3.8.2 Montaje del centro de mecanizado

La máquina CNC que se encuentra en nuestra institución no cuenta con un centro de montaje con las máquinas convencionales que se utilizan habitualmente, para ellos se debe implementar una base de sujeción para realizar el maquinado del impeller, en nuestro caso se ha planteado realizar una placa de sujeción y que vaya emperrada en el plato giratorio y a su vez el material en bruto tenga una perforación en su centro para poder pasar un perno y realizar una sujeción manual. Con el fin de no tener inconvenientes al proceso del maquinado, otra alternativa también sería colocar un mandril ajustable, pero afectaría a su movilidad del plato giratorio ya que se está añadiendo un peso extra sobre la máquina CNC.

3.8.3 Definición de geometría de trabajo

El software NX Siemens cuenta con la herramienta de CAM, que una vez definida el CAD se establece la manufactura, para eso se debe establecer que se va a utilizar una fresadora multiejes. El Software NX Siemens proyecta la geometría apropiada del material en bruto que se procede a realizar el arranque de viruta, por esta razón se puede observar en la figura la zona sombreada que representa el material a mecanizar, una vez establecidas la geometría se procede a especificar la pieza terminada, material en bruto y material base o de apoyo, con el fin de evitar cualquier colisión que se puedan presentar en las operaciones de mecanizado, una vez especificadas cada uno de los volúmenes correspondientes que corresponden a nuestro impeller, se especifica el tipo

de material, como se mencionó anteriormente siendo un prototipo se optó por dura-aluminio que por su propiedades mecánicas es apto para realizar este tipo de mecanizado.

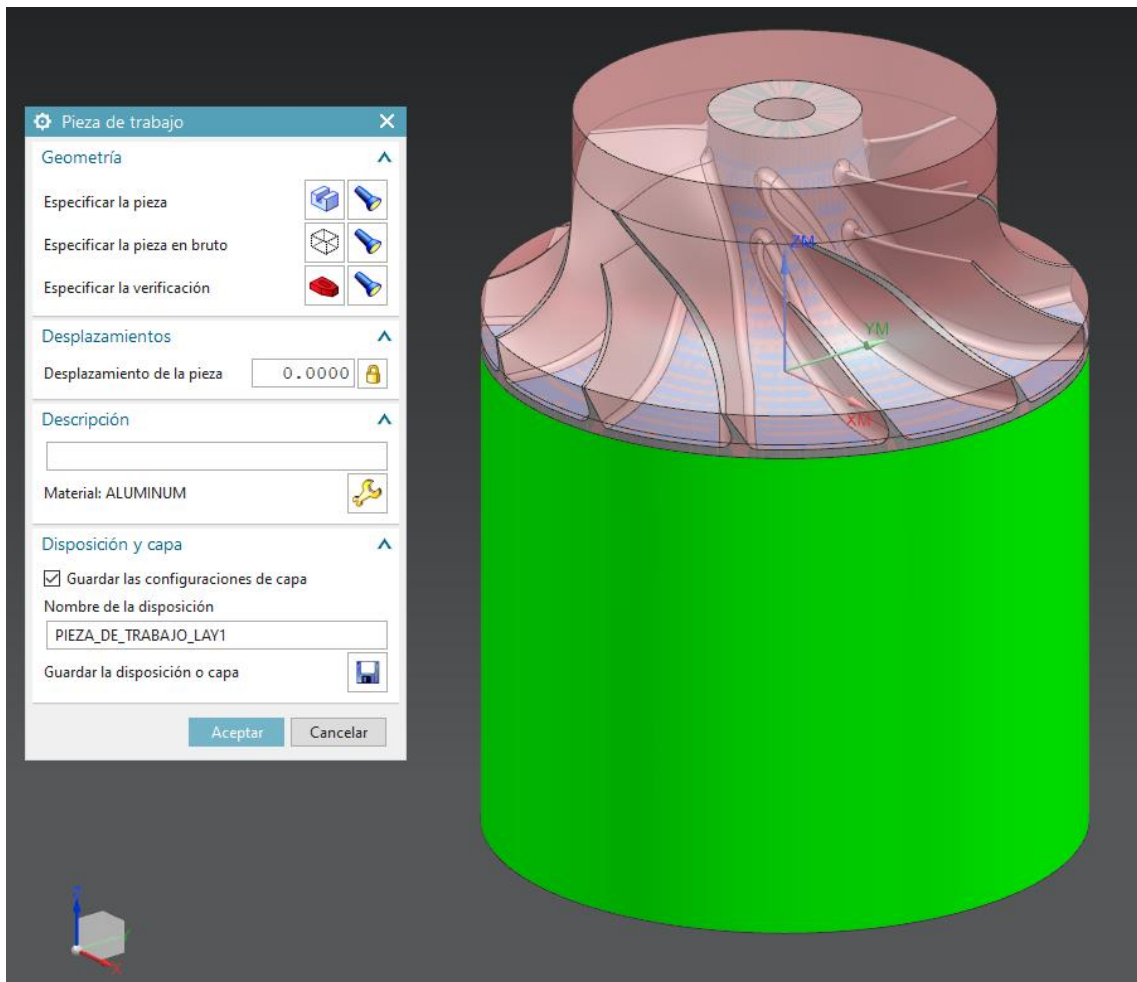


Figura 58-3. Definición de la Geometría de trabajo

Fuente: NX 12.

Realizado por: Acosta, C., Carrillo, D. 2020.

Una vez establecida la geometría se procede a establecer a configurar el tipo de fresadora, el Software NX siemens cuenta con un tipo de configuración para este tipo de turbomáquinas, esta configuración tiene configurado los parámetros para cada una de las trayectorias, para este tipo de mecanizado que debe utilizar una CNC 5 ejes por la sincronización necesaria para llegar a realizar este tipo de mecanizado, otros tipo de CNC como la de 3 ejes más 2, tiene sus limitaciones, por lo que este tipo de máquina para esta geometría no es recomendable, sino una maquinas multiejes 5 ejes.

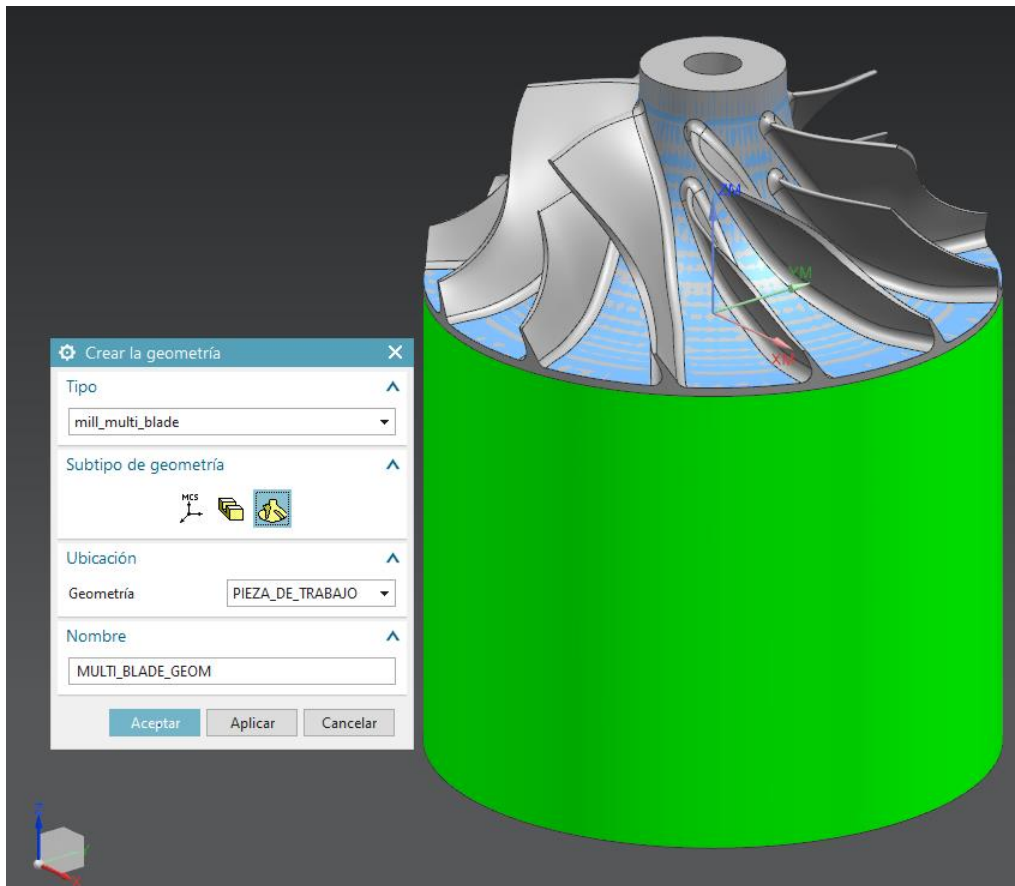


Figura 59-3. Tipo de fresadora para álabes múltiples mediante NX 12.

Fuente: NX 12.

Realizado por: Acosta, C., Carrillo, D. 2020.

En esta sección, se procede a configurar la geometría de las diferentes trayectorias del impeller, tales como especificar el núcleo, el carenado, alabe principal y secundario, etc. Esto se realiza con el fin de una vez se cree la herramienta de trabajo con la cual la fresadora multiejes va a manufacturar, esta reconozca los diferentes componentes del impeller como a su vez su eje de rotación, cada una de las secciones tiene sus propios parámetros configurados del impeller.

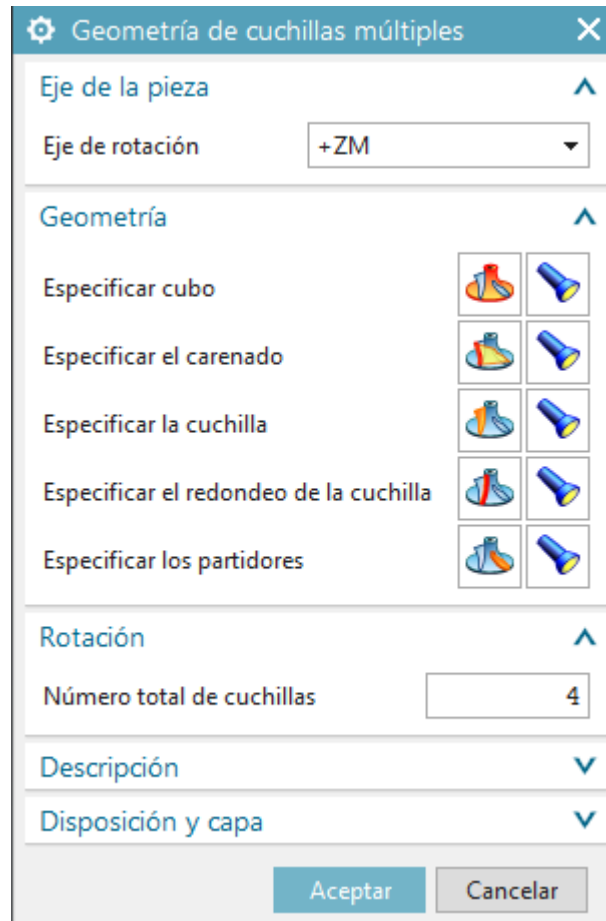


Figura 60-3: Configuración de la geometría del impeller mediante NX 12.

Fuente: NX 12.

Realizado por: Acosta, C., Carrillo, D. 2020.

Una vez realizado la configuración de la geometría del impeller que se requiere realizar por medio de este modelado el siguiente paso a seguir es el de generar las estrategias del mecanizado de los álabes del impeller, esto va de la mano con la capacidad técnica y tecnológica que posee la máquina CNC con la que se va a trabajar, en este caso estamos refiriéndonos a la CNC ROMI 620-5X con la cual se procederá a construir el impeller, la cual nos ofrece un módulo multiejes para poder fabricar el impeller descrito en este trabajo.

Para la parte del diseño se ha estipulado primero realizar un desbaste o pre desbaste con la intención de menorar el material bruto ya que el propósito del estudio es generar una estrategia para el maquinado del impeller mediante la máquina CNC de cinco ejes, esto se lo realizaría con el fin de ahorrar tanto tiempo así como para un mejor funcionamiento de la máquina, para esto

primero se realizó la simulación CAM de mecanizado en el software NX 12 debido a la variedad de operaciones que nos ofrece respecto con la fabricación mediante la operación de fresado multi eje o también llamado “mill_multi_blade” con el fin de garantizar que las herramientas no se choquen entre si dando como resultado un buen acabado del impeller, tal y como se muestra en la figura de montaje del elemento en la máquina CNC.

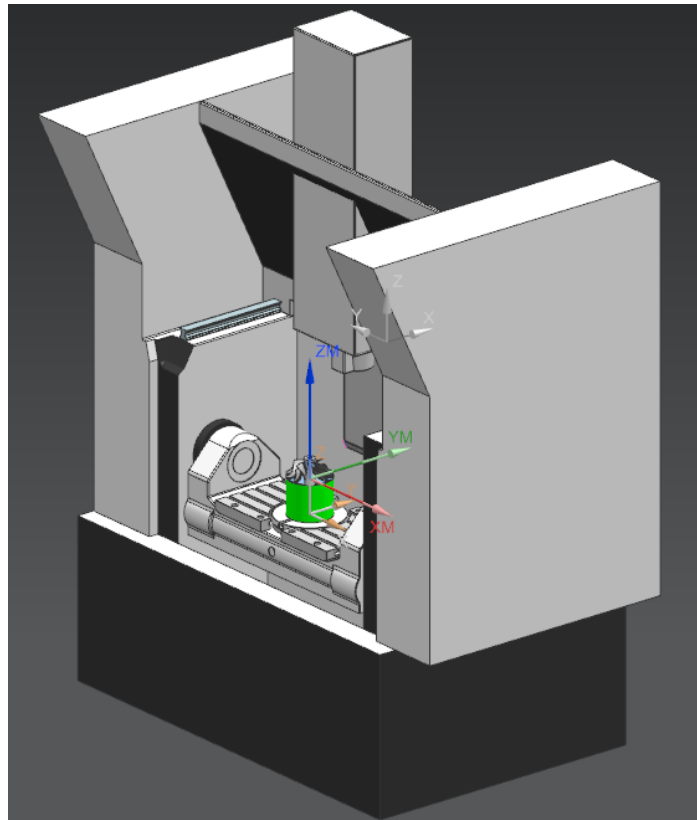


Figura 61-3: Montaje del impeller en la máquina CNC mediante NX 12.

Fuente: NX 12.

Realizado por: Acosta, C; Carrillo, D. 2020.

3.8.4 Funciones de programación NX específicas del proceso para el mecanizado del impeller.

Se puede aprovechar el fresado de turbomáquinas NX para reducir el esfuerzo de programación aplicando funciones de programación CNC de 5 ejes configuradas específicamente para el mecanizado de piezas rotativas multiejes. Las palas se pueden curvar con cortes. Además, se admiten varios divisores.

NX Turbomachinery Milling le permite trabajar de manera eficaz con cualquier dato CAD independientemente de su sistema de origen. Las cuchillas pueden estar hechas de una o varias superficies. Los huecos y superposiciones entre superficies se reparan automáticamente. Puede producir trayectorias de herramientas fluidas en superficies adyacentes con líneas de parámetros UV inconsistentes.

Esta aplicación le permite ahorrar tiempo al definir operaciones de mecanizado para una sección del impulsor y luego completar automáticamente el resto de la pieza.

3.8.4.1 Características.

- Funciones específicas del proceso para el mecanizado de cuchillas
- Capacidad para mecanizar divisores únicos o múltiples
- Desbaste simultáneo de 5 ejes
- Acabado del cubo
- Acabado de cuchilla / partidor
- Suavizado del eje y la trayectoria de la herramienta
- Comprobación y prevención de colisiones del titular
- Capacidad para reparar automáticamente la geometría de entrada
- Optimización de la velocidad de alimentación
- Operaciones y trayectorias de herramientas asociativas

3.8.5 Desbaste del cubo.

Esta operación reconoce las trayectorias de herramientas especialmente optimizadas diseñadas para el desbaste del cubo del impeller, así como controlar con precisión el paso lateral, el patrón de corte y el ángulo de la herramienta. Cada una de estas operaciones se realizan sección por sección, se debe establecer los parámetros para una sección después se realizar una operación que el software NX siemens cuenta integrada para realizar la operación de transformar (matriz polar), una vez realizada todas las operaciones se detallara dicha operación.

3.8.6 Desbaste de cuchillas múltiples.

Esta operación de fresado con los ejes múltiples consiste en quitar el material que se encuentra entre las cuchillas y los partidores mediante el uso de niveles de corte entre el eje y el cubo; la geometría de la pieza de trabajo está definida en la geometría madre, en la cual se especifica el núcleo, la cuchilla que se va a utilizar así como el redondeo de la cuchilla además de la geometría

del partidador, este tipo de herramientas es recomendable usarlas para el desbaste entre cuchillas y partidores en el diseño del impeller.

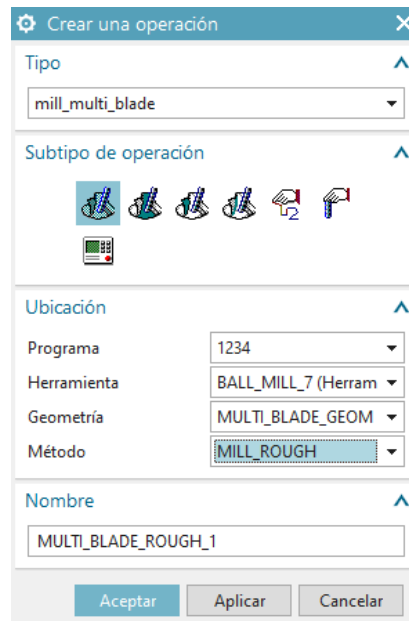


Figura 62-3: Parámetros de desbaste del cubo

Fuente: NX 12.

Realizado por: Acosta, C., Carrillo, D. 2020.

3.8.7 *Acabado con redondeo.*

El desbaste con el método “Mill Rough” es un aproximación del mecanizado para ellos como en términos generales consiste en el arranque de viruta de forma rápida con velocidad bajas y un avance de corte considerable dependiendo la operación que se esté realizando y a sus vez el tipo de material, esta sección se establecen los parámetros del mecanizado, como es la velocidad de corte que en nuestro caso la velocidad de corte establecida es de 800 RPM y , a sus vez no se van a generar grandes esfuerzos de cortes, como ya se estableció anteriormente las rección o las trayectorias de desbastes por el simple hecho el software ya reconoce la zona de desbaste y como va a ir avanzando durante el mecanizado. el método guía del desbaste de la hoja se lo realiza en zigzag con ascenso con pasadas constante para que se realice de forma simultánea, también se debe establecer una aproximación al perfil requerido para que con otra operación se dé el acabado final, esta operación se configuran en “método guía” donde se establece un aproximación el porcentaje para que no sobrepase a la forma requerida, por recomendación se recomienda un 15% en distancia entre la herramienta y el perfil requerido, y una máxima del 40%. Los niveles del

corte se realizan desde cubo, quiere decir desde la parte superior y consecuentemente en descenso con una profundidad de corte constante una vez establecida cada uno de los parámetros necesarios para esta operación que debe “generar” en la parte inferior en acciones, una vez generada la operación se va a observar el impeller que se colorea la trayectoria de la herramienta con esta acción se comprueba que los parámetros están establecidos correctamente.

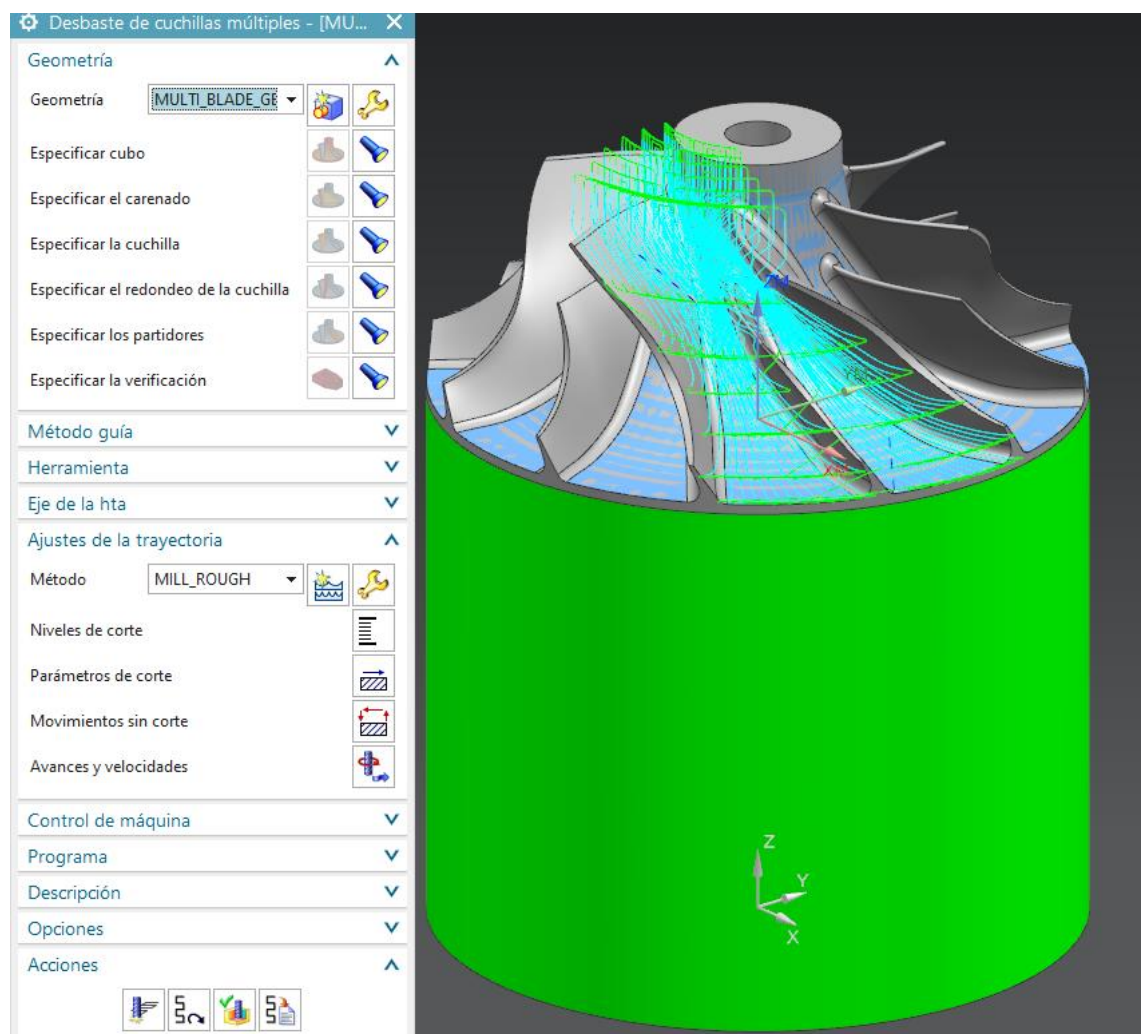


Figura 63-3: Generación de la geometría de desbaste

Fuente: NX 12.

Realizado por: Acosta, C., Carrillo, D. 2020.

Una vez generada la operación en la sección anterior en la parte de acciones, la tercera acción es verificar o validar la operación para ello se simula y se puede visualizar como la herramienta va realizando las operaciones de desbastes y se puede observar el acabado que se realiza ya que es

una aproximación para realizar la otra operación del acabado del cubo y los alabes respectivamente.

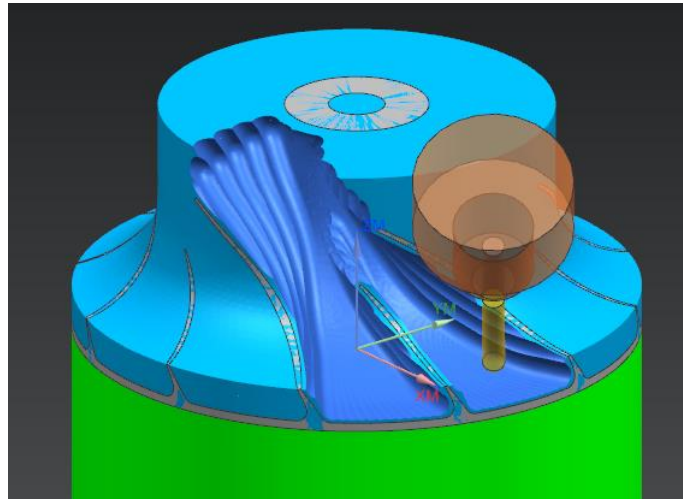


Figura 64-3: Simulación de la fabricación de desbaste mediante un acabado rugoso.

Fuente: NX 12.

Realizado por: Acosta, C., Carrillo, D. 2020.

3.8.8 *Acabado de los álabes primarios y separadores.*

Esta operación con ejes múltiples que acaban las cuchillas y los partidores en niveles de corte múltiples para la utilización de esta herramienta del software se debe definir la geometría de la pieza de trabajo y especificar tanto el eje, así como el redondeo de cuchilla y la geometría del partido, para lo cual se debe editar el método guía para especificar el patrón de corte.

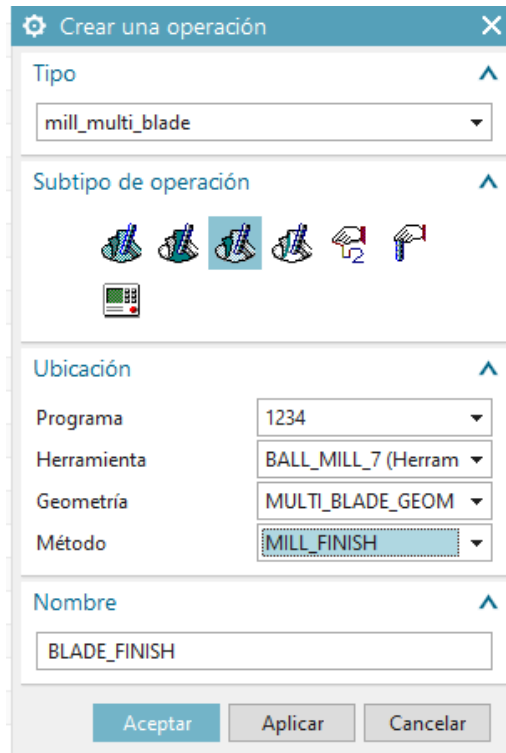


Figura 65-3: Finalización de los álabes mediante un acabado fino.

Fuente: NX 12.

Realizado por: Acosta, C., Carrillo, D. 2020.

Como se establece la operación de acabado de los alabes para esta se requieren dos operaciones diferentes, no se puede realizar simultáneamente para el alabe principal y el splitter. Pero los parámetros de acabado son los mismo, una vez establecida las condiciones para el alabe principal se procede con el alabe secundario para ello se implementa una operación con las mismas caracterizas, la diferencia es la modificación está en “método guía” que en esta sección se debe seleccionar “partidor 1” el software NX siemens estableció una vez que seleccionamos cada una de las secciones del impeller. Como se trata de una operación de acabado para ello hemos optado en los parámetros con menor avance de corte y mayores revoluciones. Se estableció 1600 RPM y un avance de corte de 250 mmpm con el fin de tener una menor rugosidad y mayor acabado superficial de los alabes. En los niveles de corte se debe tener en cuenta también ciertos parámetros con respecto al desbaste el cubo. El modo de profundidad debe desplazarse a lo largo del cubo y profundidad de corte hasta la cresta. Así mismo para validar esta operación de la sección de acciones de debe generar, para que la operación este correcta se puede observar en la figura que se denota la trayectoria de la herramienta.

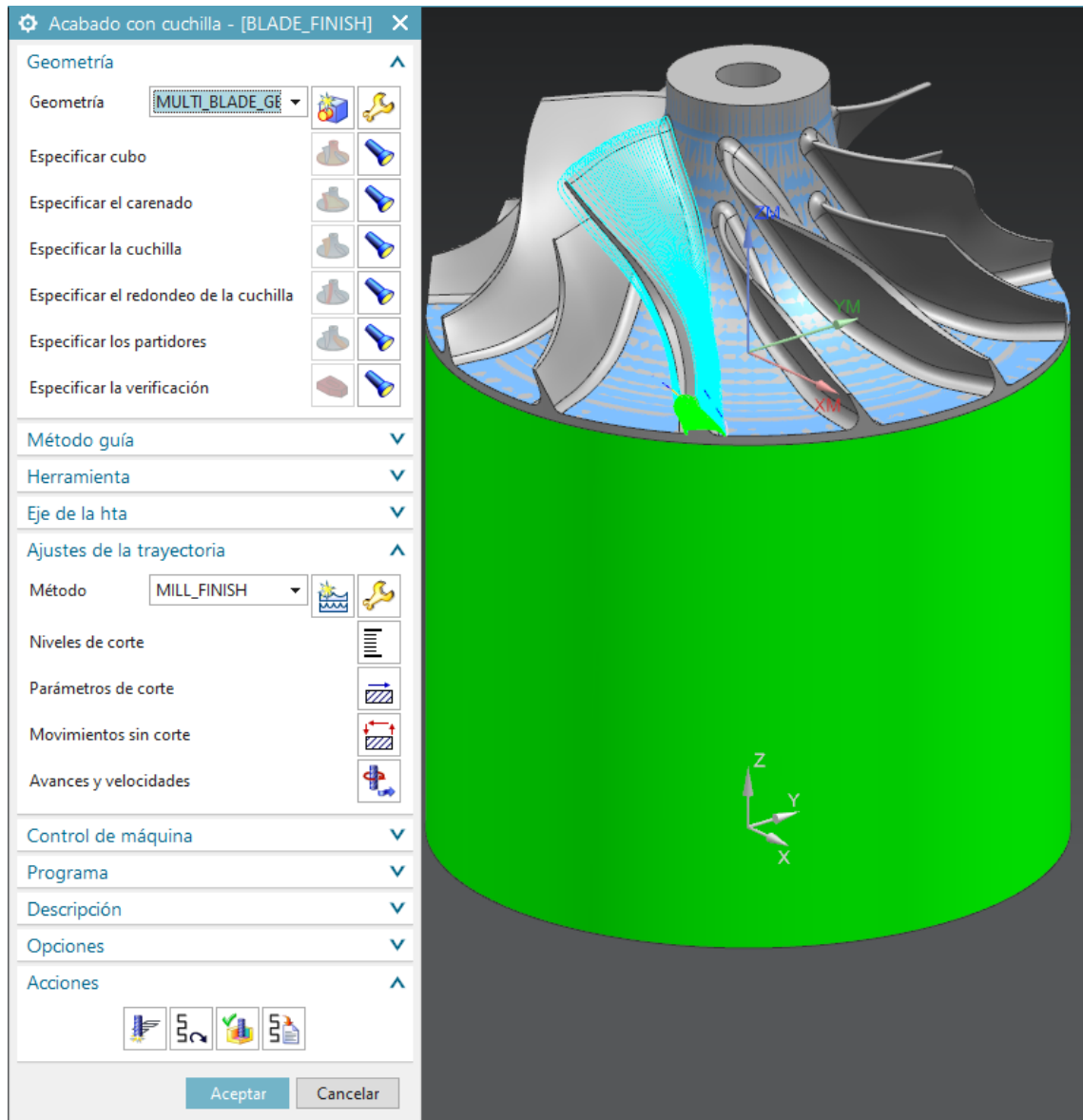


Figura 66-3: Parámetro para el acabado de los álabes.

Fuente: NX 12.

Realizado por: Acosta, C., Carrillo, D. 2020.

En esta sección se puede observar la proyección del acabado de los álabes principal y el splitter. Esto se logra con la acción de verificar y a la vez se puede simular y observar cómo se va generando el movimiento de la herramienta para a lo largo de mecanizado.

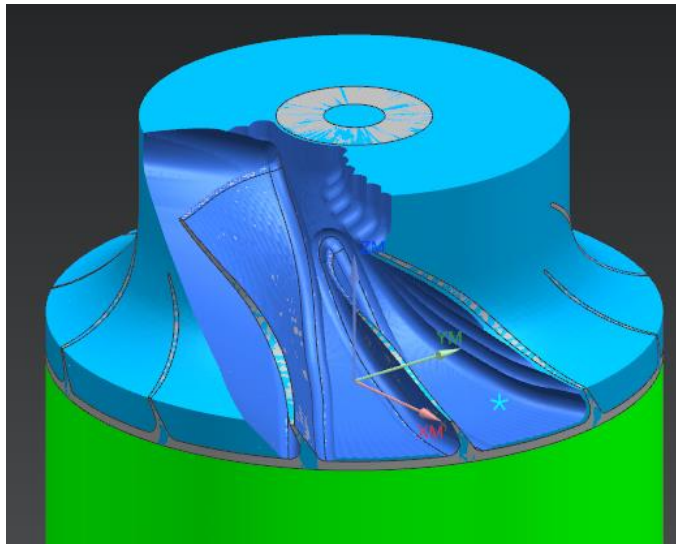


Figura 67-3: Simulación de acabado de los álabes.

Fuente: NX 12.

Realizado por: Acosta, C., Carrillo, D. 2020.

3.8.9 Acabado del cubo.

Para esta operación con los ejes múltiples se debe definir la geometría en el apartado de PIEZA DE TRABAJO, en el cual se debe especificar el eje, la cuchilla, redondeo y la geometría del partidor, además se debe editar el método guía para especificar el patrón de corte, esta operación es recomendada para el acabado de ejes de piezas concernientes a turbo maquinaria.

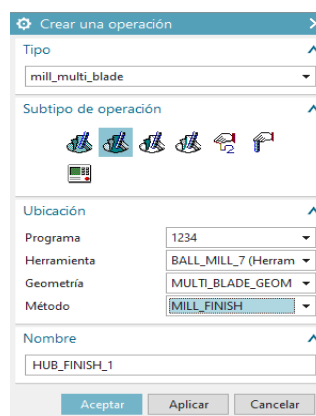


Figura 68-3: Programación para el acabado del cubo.

Fuente: NX 12.

Realizado por: Acosta, C., Carrillo, D. 2020.

Para establecer los parámetros del acabado del cubo se debe tomar en cuenta primeramente el “método guía”, se deben establecer ciertos parámetros, que para cada operación de mecanizado tiene diferente procedimiento, en esta sección se especifica la arista de la cuchilla que debe recorrer a lo largo de la pieza, así mismo ciertos parámetros como los de patrón de corte que debe realizarse en zigzag en ascenso, dirección de corte de forma mixta y las pasadas de forma constante. A su vez las revoluciones de la herramienta que para esta operación también se estableció 1600 RPM y un avance de corte de 250 mmpm para tener un mejor acabado en la superficie de cubo. Para validar los parámetros establecidos se debe generar para que reconozca la acción que va a realizar esta operación de mecanizado.

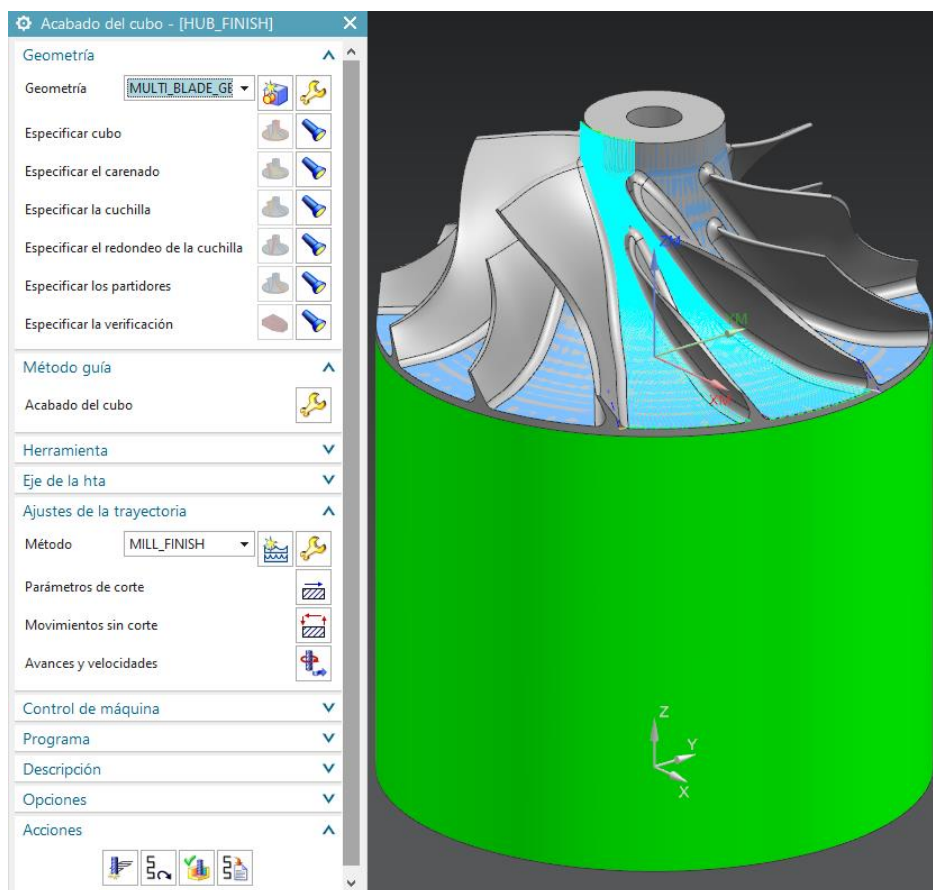


Figura 69-3: Parámetro para el acabado del cubo.

Fuente: NX 12.

Realizado por: Acosta, C; Carrillo, D. 2020.

La acción de validar se debe realizar en cada una de las operaciones y simular para ver si no se producen colisiones o intermitencia al momento del mecanizado. Como se puede observar

tenemos acabo la sección del cubo, con lo que se está cumpliendo con los requerimientos del acabado del impeller.

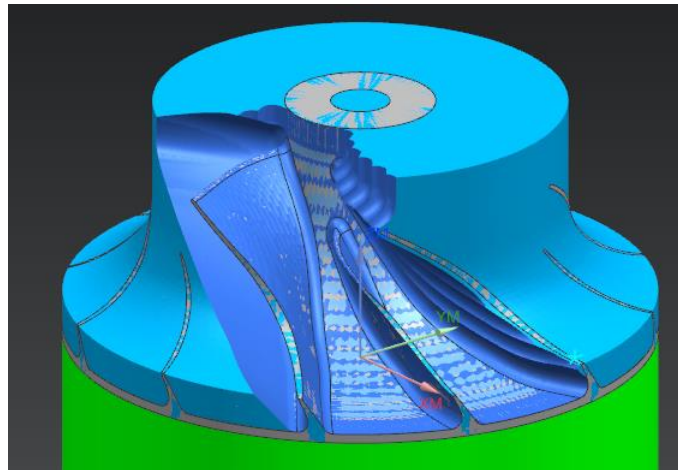


Figura 70-3: Simulación del acabado del cubo.

Fuente: NX 12.

Realizado por: Acosta, C., Carrillo, D. 2020.

3.8.10 *Acabado con redondeo.*

Este tipo de operación con ejes múltiples que acaban con el redondeo de las cuchillas y partidores con pasadas múltiples se lo debe realizar mediante pasos como la definición de la geometría en la pieza de trabajo en el cual se debe especificar parámetros antes mencionados como eje, redondeo de cuchilla y geometría del partidor con el fin de que sirva de guía para especificar el patrón de corte; como recomendación se debe tomar en cuenta que el acabado de los redondeos de cuchillas y partidores previamente desbastados se los debe realizar con una herramienta más grande.

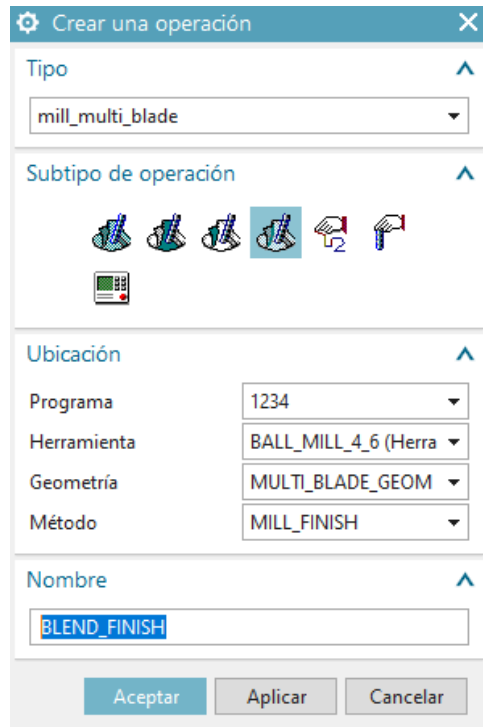


Figura 71-3: Programación para acabado con redondeo.

Fuente: NX 12.

Realizado por: Acosta, C., Carrillo, D. 2020.

Para esta última sección para dar terminada todas las operaciones y concluir con una sección del impeller, se debe dar un redondeado entre el cubo y los alabes para que no contara con zonas de interferencia del flujo, así mismo esta operación nos permite dar redondeado a la zona del alabe como del splitter. Como me menciono anteriormente. No se puede realizar simultáneamente el alabe y el splitter, para ello se requiere una nueva operación similar y lo único que cambia es el método guía que ya no es el alabe sino el partidor 1, es como el software NX lo reconoce para realizar el acabado así mismo las revoluciones son 1600 RMP y el avance de corte es 250 mpmm.

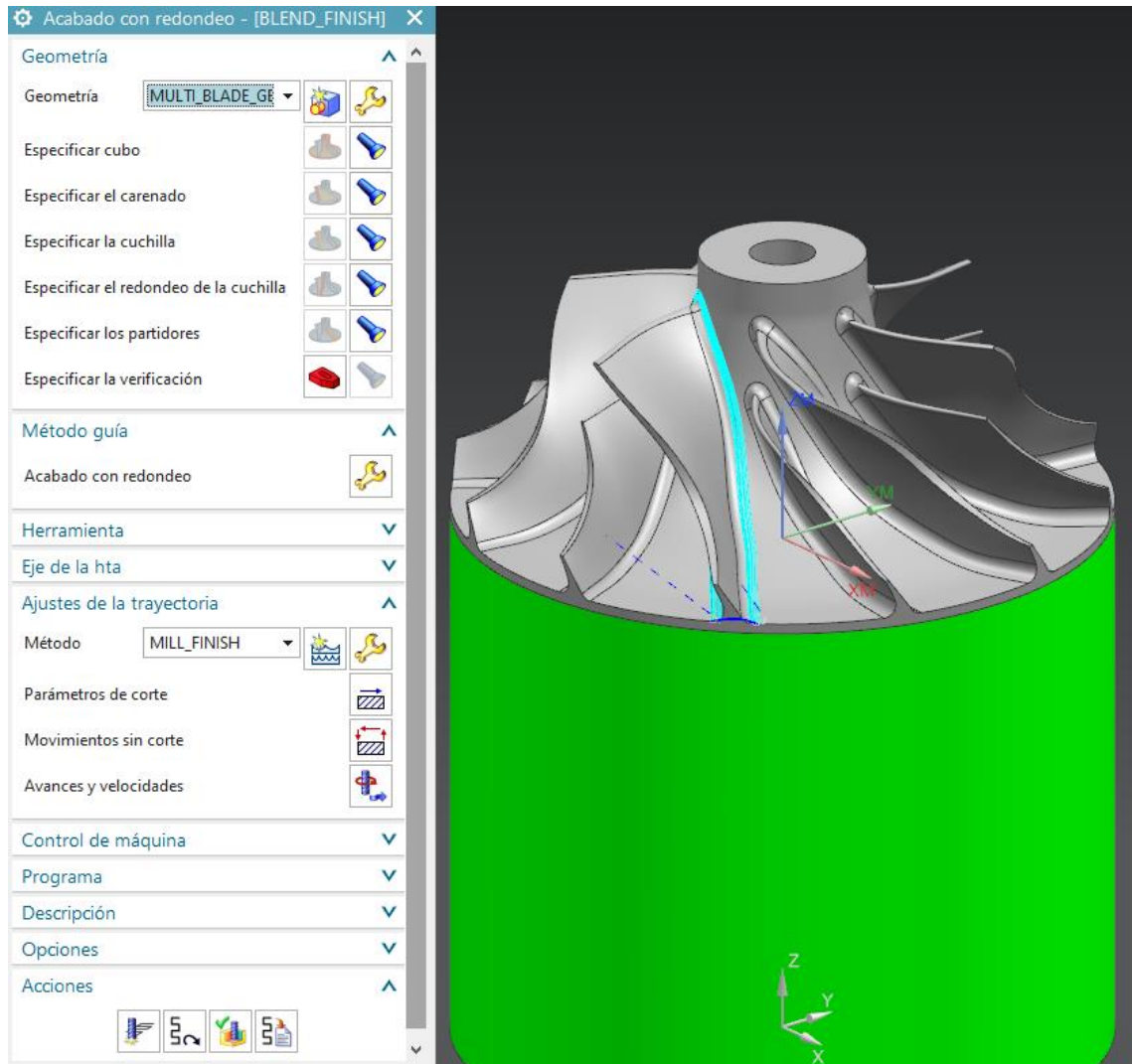


Figura 72-3: Programación para acabado con redondeo.

Fuente: NX 12.

Realizado por: Acosta, C., Carrillo, D. 2020.

3.9 Generación de matriz polar “Transformar”.

Esta operación nos brinda la posibilidad de generar una matriz polar para los alabes restantes para mecanizar, también existe la posibilidad de simultáneamente ir agregando operaciones, pero posee una desventaja en la cual se debe nuevamente configurar cada una de las operaciones e ir generando y verificando lo que conlleva a un mayor gasto computacional, esta operación nos brinda la facilidad de generar automáticamente la simulación, para generar esta configuración lo que se debe realizar es lo siguiente:

- Seleccionar el tipo de generación, la opción más viable “rotar sobre un punto”, a continuación, en especificar punto pivote abrimos el cuadro de dialogo.
- Se nos abrirá un cuadro de dialogo, de manera similar el tipo, seleccionamos “punto deducido” y las coordenadas del punto deben ser el cero máquina, si el cero pieza coincide con el cero pieza no se tendría inconvenientes seleccionar el más adecuado.
- En el método de ángulo “especificar” y el ángulo deben ser los 360°. Finalmente.
- En resultado seleccionamos “copia”, en “divisiones de la distancia o ángulo depende el número de alabes, en nuestro caso son 6, y número de copias 5”.

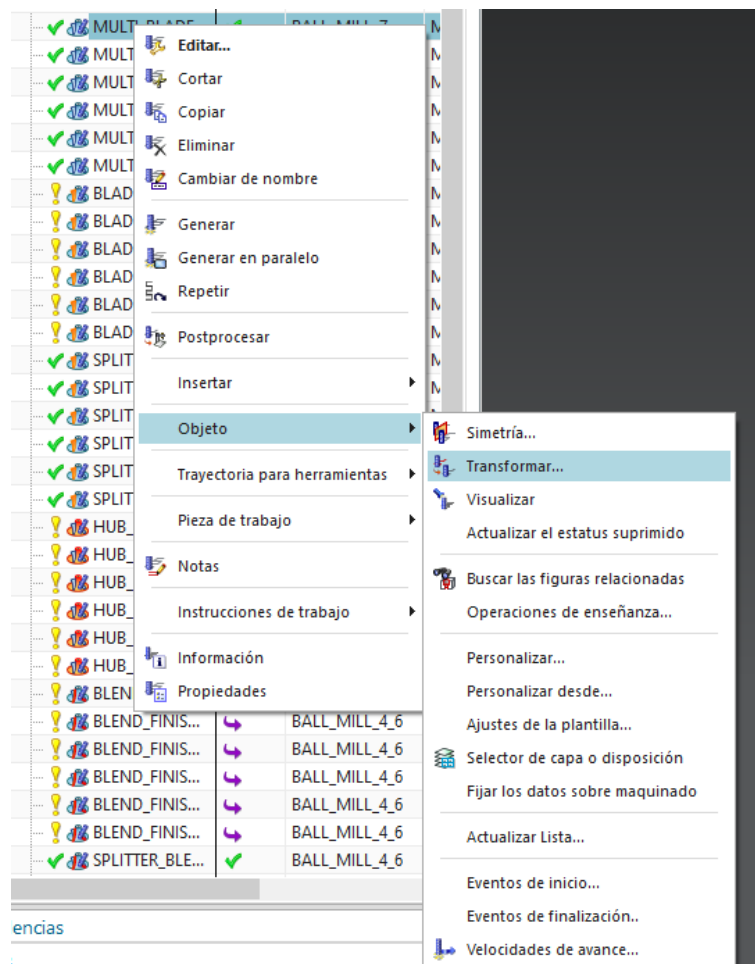


Figura 73-3: Operación transformar.

Fuente: NX 12.

Realizado por: Acosta, C., Carrillo, D. 2020.

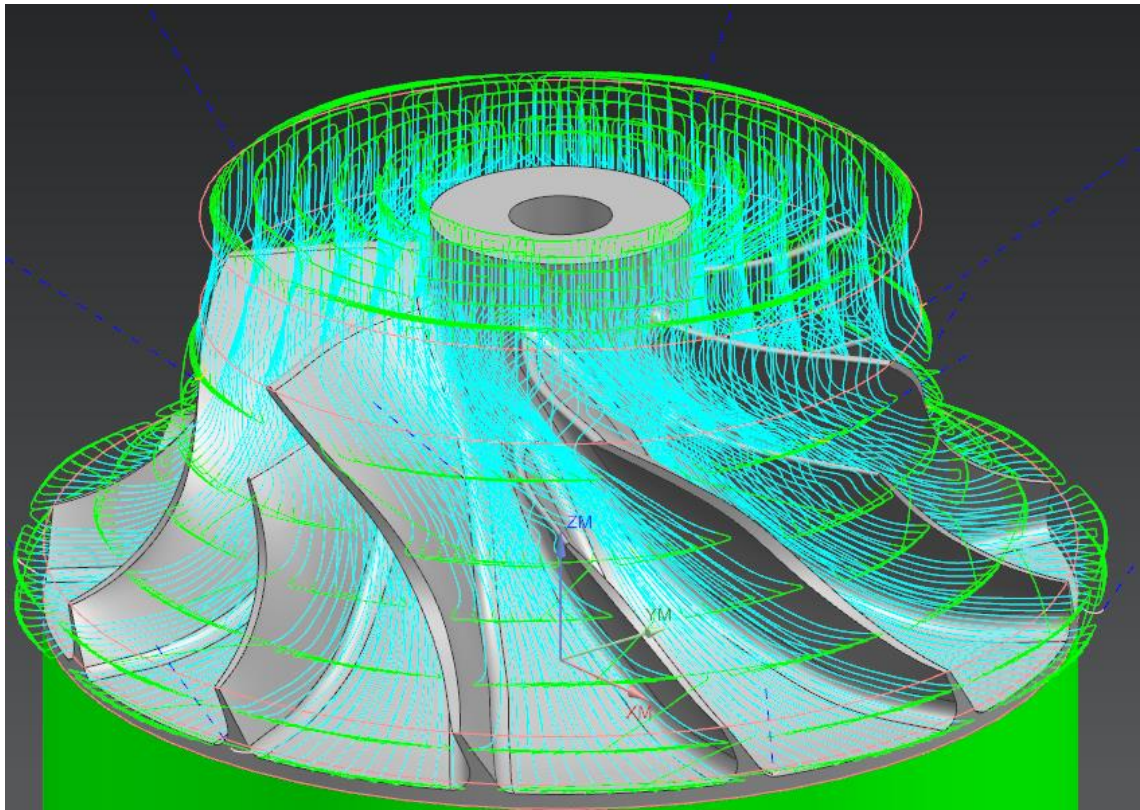


Figura 74-3: Simulación de Matriz Polar.

Fuente: NX 12.

Realizado por: Acosta, C., Carrillo, D. 2020.

Este procedimiento se lo debe realizar para cada una de las operaciones que se hayan generado al inicio de las operaciones, una vez realizada cada operación, siempre se ubican al final porque reconoce como una nueva operación, como el caso de “MULTI BLADE ROUGH” cuando se realiza la operación de transformación se ubica al final de todas las operaciones lo que se debe es arrastrar para que las operaciones de “MULTI BLADE ROUGH” sea continuas con el fin de evitar colisiones y que no haya cambio de herramientas repentinas. De igual manera se lo realiza con cada una de las operaciones que se hayan generado para el mecanizado del impeller.

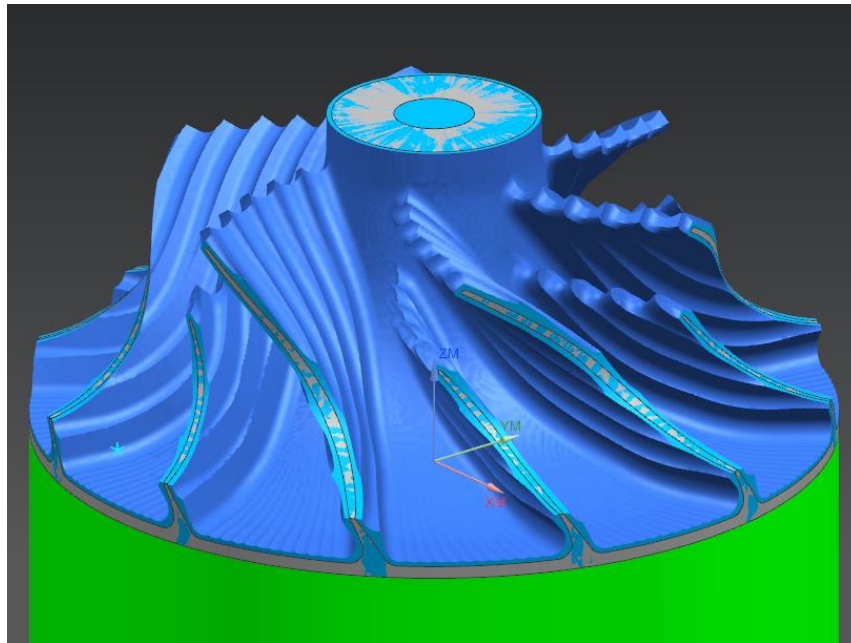


Figura 75-3: Simulación de mecanizado mediante Matriz Polar.

Fuente: NX 12.

Realizado por: Acosta, C., Carrillo, D. 2020.

3.9.1 Selección de herramientas de trabajo.

El fresado de ranuras, fresado trocoidal y el fresado por inmersión, con una de las estrategias más utilizadas, como es usual el arranque de viruta hasta una aproximación se puede realizar a velocidades bajas, pero como mayor profundidad de corte una vez realizada la primera etapa se procede a realizar el acabado en el cual consistes trabajar a mayores revoluciones y el avance más lento y menor profundidad de corte. Para este caso el mecanizado debe definirse por patrones en zigzag, y a pesar de la alta tasa de remoción de material. El fresado de ranuras genera altas fuerzas de corte radial, es por eso por lo que, para este proceso para generar menos esfuerzos en la herramienta, cada nivel de desbaste se puede dividir en más pasadas. El fresado trocoidal consiste en la combinación del movimiento de avance de la herramienta y trayectorias circulares de la herramienta. Esta estrategia implica menos fuerzas radiales, por el contrario, el diseño y la generación de una trayectoria trocoidal de cinco ejes es muy compleja. Además, se necesita mayores capacidades dinámicas de la máquina herramienta. El fresado por inmersión, el mecanizado lo realiza el filo secundario, en lugar del principal en este caso las fuerzas de corte predominantes aparecen en la dirección axial. Con el fin de realizar un desbaste sin provocar colisiones, una de las herramientas más adecuada para este tipo de operaciones, una de las

limitantes por su forma geometría no se puede realizar un acabado completo lo cual se lo debe hacer por secciones con el fin avanzar con la mayor cavidad posible, una vez realizado las operación de desbastes con la mismas herramienta en nuestro caso hemos definido la herramienta “KENNAMETAL con su numeración F4AL0800AWL30L120”, que podemos realizar el desbastes y me manera similar el acabado. Este catálogo nos brinda la una selección adecuada para según eso elegir una herramienta correcta, la geometría del impeller son superficies en 3D y por las trayectorias que se deben seguir, ya que es una fresa de mango de metal duro integral de alto rendimiento para mecanizado intensivo.

Número de orden	Número de catálogo	Grado	Lado de la máquina estilo adaptador	D1	re	Ap1 máx	L3	L
6433718	F4AL0800AWL30L120	KC639M	Recto-Cilíndrico	8	12	12	12,5	150

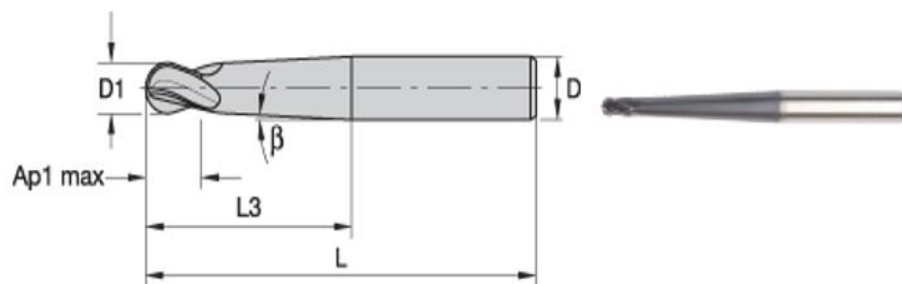


Figura 76-3: Herramienta de desbaste KENNAMETAL F4AL0800AWL30L120.

Fuente: (Castillo 2016)

Para el redondeado de los alabes y los alabes divisores “splitter” se seleccionó una herramienta con similares características, pero el diámetro de la esfera con un diámetro más fino, como se estableció en el software CAM. Esta herramienta es de la marca “KENNAMETAL con su numeración F4AL0400AWL30L50”.

Número de orden	Número de catálogo	Grado	Lado de la máquina estilo adaptador	D1	re	Ap1 máx	L3	L
6433711	F4AL0400AWL30L50	KC639M	Recto-Cilíndrico	4	6	5	5,5	100

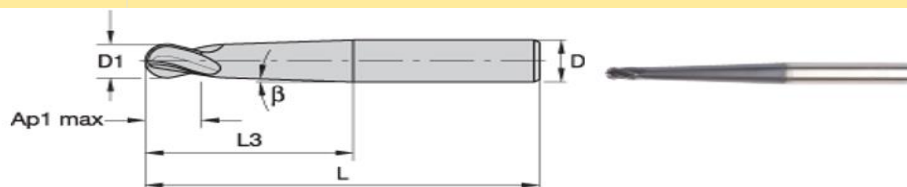


Figura 77-3: Herramienta de redondeo KENNAMETAL F4AL0800AWL30L120.

Fuente: (Duda y Raghavan, 2016) .

3.10 Impresión en 3D

La tecnología de fabricación digital, también conocida como impresión digital o fabricación aditiva, crea objetos físicos a partir de una representación geométrica por medio de adición de material capa por capa. La tecnología de impresión 3D es ampliamente utilizada en el mundo para diversas aplicaciones con la mejora de esta tecnología de impresión en 3D en términos de resolución, materiales y velocidad de impresión. Las características de la fabricación aditiva como la libertad de diseño de las piezas, complejidad, peso ligero, consolidación de piezas y diseño. Un interés particular en la fabricación aditiva es cualquier tipo de diseño de código abierto el cual es asistido directamente desde un modelo asistido por computadora (CAD) (Shahrubudin y Ramlan, 2019).

3.10.1 *Materiales utilizados para la impresión 3D*

Cualquier proceso de impresión 3D se requiere materiales de alta calidad que cumplan con especificación dependiendo de campo de aplicación que se vaya a desempeñar el producto. La tecnología de impresión 3D es capaz de producir piezas completamente funcionales en una amplia gama de materiales, incluidos cerámicos, metálicos, polímeros y sus combinaciones en forma de materiales híbridos, compuestos o de clasificación funcional (MGF). La tecnología 3D que cubre amplia gama de aleaciones utilizadas en una variedad de industrias. Aplicaciones de válvulas, impulsores, bombas convencionales, etc (Shahrubudin y Ramlan, 2019).

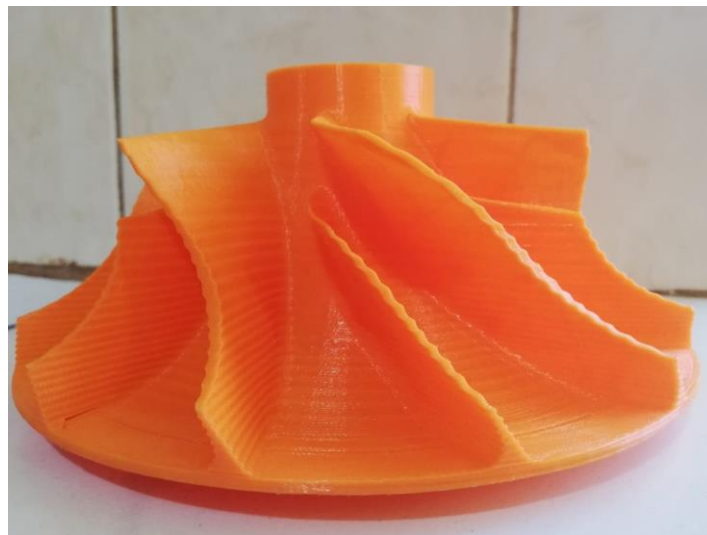


Figura 78-3: Prototipo de impeller core cartridge impreso en 3D

Realizado por: Acosta, C., Carrillo, D. 2020.

3.10.2 Ventajas y desventajas

Las ventajas son la libertad de diseño, la complejidad gratuita, la posible eliminación de herramientas, el diseño ligero, la consolidación de piezas al reducir el montaje. Requisitos y eliminación de etapas de producción. Las ventajas en la industria automotriz como en el diseño del impeller para el turbocompresor, haciendo unos de la complejidad de formas gratuitas

Las desventajas actuales (AM sigue siendo una nueva tecnología) son tasa de construcción lentas, tamaño restringido en la cámara de construcción, se requiere un esfuerzo considerable para el diseño de aplicaciones y configuraciones de parámetros de procesos, precisión dimensional, método de postratamiento necesario acabado superficial y la estabilidad y calidad del producto

3.11 Costos

A continuación, se muestra un desglose de los costos preliminares que involucra este proyecto.

Tabla 4-3: Costos directos

DESCRIPCIÓN	Cant	Precio Unitario (\$)	Valor total (\$)
COMPONENTES MECÁNICOS			
Pernos (diferentes medidas)	10	0.60	6.00
Eje de aluminio 7075 T6 Ø120X500	1	180.00	180.00
Fresa de Turbina F4AL0800AWL30L120	3	60	180.00
Fresa se segmentos circulares F4AL0400AWL30L050 para desbaste	2	50	100.00
Mandril	1	300.00	300.00
Thinner laca	2	2.00	4.00

Aceite soluble (taladrina)	1	25	25
		Subtotal 1	795 USD

MANO DE OBRA				
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	SALARIO REAL/HORA	HORAS-HOMBRE	COSTO TOTAL
Técnico CAD/CAM	1	10	45	450
Ayudante general en	2	2.5	80	400
CNC 5 ejes	1	60	9	540
			Subtotal 2	1390 USD
Total				2185 USD

Realizado por: Acosta, C., Carrillo, D. 2020.

Tabla 5-3: Costos indirectos

DESCRIPCIÓN	COSTOS
Varios	250
Transporte	80.00
TOTAL	\$ 330

Realizado por: Acosta, C., Carrillo, D. 2020.

Tabla 6-3: Costos totales

DESCRIPCIÓN	COSTOS
Costos directos.	2185.00
Costos indirectos	330.00
TOTAL	\$ 2515

Realizado por: Acosta, C., Carrillo, D. 2020.

CAPÍTULO IV

4. Análisis y resultados

En los campos de simulación, los números de cuadrícula y la distribución tiene gran influencia en los resultados. La irradiación de la distribución y el número de red puede dar a lugar a malos resultados. Para establecer los numero de cuadricular se utilizó un método de mallado para impeller centrifugo que configuramos en ANSYS TurboGrid para generar la malla global.

4.1.1 Análisis de velocidad

El analisis de flujo de la velocidad de flujo se puede observar en la figura que en los alabes separadores se forma una turbulencia, para poder correguir esa distorcion, los alabes separadores deben ir por debajo de los alabes principales que el fluido de ataque no vaya directamente a los alabes separadores sino directamente a los alabes principels los cuales se encargar directamnete de que el fluido tome una direccion determinada. En la siguinete figura se puede observar la velocidad lineal, cuando se estabalecio las condiciones de entrada fue Dla velocidad rotacional, si se realizar un pequeño analisis podemos observar una velocida de entrada y una velocidad de salida del del fluido que su incremento es considerable.

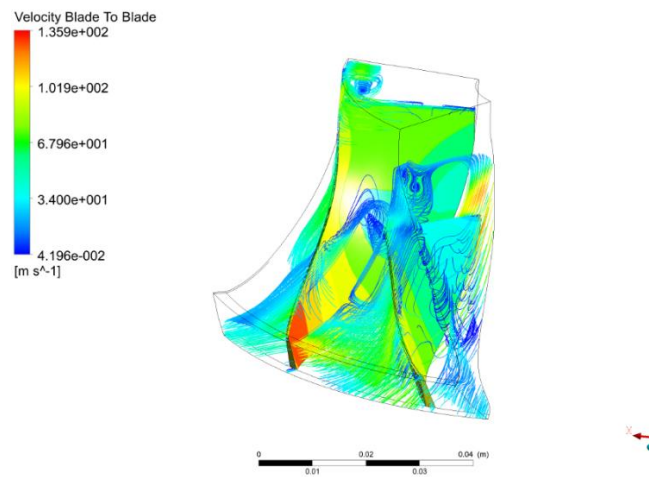


Figura 79-4: Simulación de flujo de la velocidad en la superficie del impeller

Fuente: ANSYS.

Realizado por: Acosta, C., Carrillo, D. 2020.

4.1.2 *Análisis de temperatura*

El cambio de temperatura en la entrada y salida del fluido, mientras haya mayor compresión de este, su temperatura va a seguir aumentando, como se estableció en 25000 rpm la rotación del impeller su temperatura puede ser mucho mayor de las esperadas, en nuestro caso no presentar un delta de temperatura muy relevante, por lo que el impeller no va a tener fallos debido a la temperatura. Pero se debe tener en cuenta que la temperatura de entrada al turbocompresor no va a ser constante, debido a las condiciones ambientales.

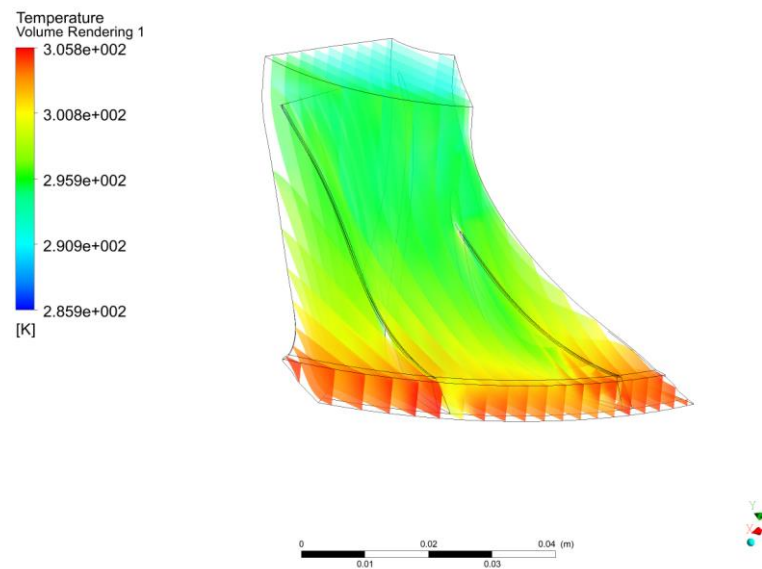


Figura 80-4: Temperatura a lo largo de los álabes del impeller

Fuente: ANSYS.

Realizado por: Acosta, C., Carrillo, D. 2020.

4.1.3 *Análisis de presión*

El impulsor tiene como principal objetivo es aumentar la presión del fluido para obtener una mayor eficiencia en el arranque del motor del cual se vaya a emplear, los impeller de menor diámetro tiene una mejor relación de compresión por lo que su velocidad puede ser mucho mayor, hasta que se establezca una presión estática global que lo que se va a obtener en la salida del impeller como el fluido entra con una presión atmosférica, es su condición de entrada. A la salida del impeller interviene varios factores, velocidad de la rotación, números de alabes del impulsor, voluta, etc. En la figura se puede apreciar un aumento de presión en la salida. Cuanto mayor sea el número de alabes mayor es su relación de compresión.

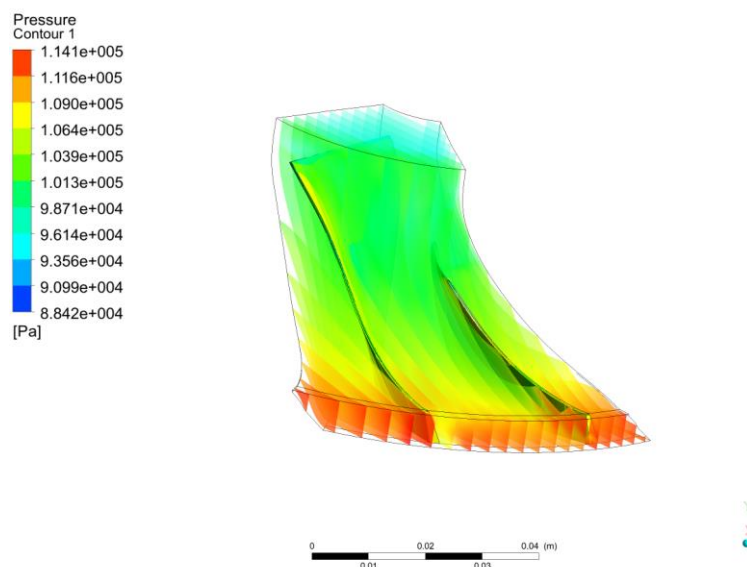


Figura 81-4: Presión a lo largo del impeller.

Fuente: ANSYS.

Realizado por: Acosta, C., Carrillo, D. 2020.

Se observa una caída de presión, a baja corriente se observa una presión más baja de las que se estableció como condiciones de entrada. Un motivo de esto puede ser por las turbulencias que se provocan por los alabes separadores del impeller, pero se puede observar que, si se llega una presión deseada, ya dicho bucle no afecta en gran medida a la presión de la salida.

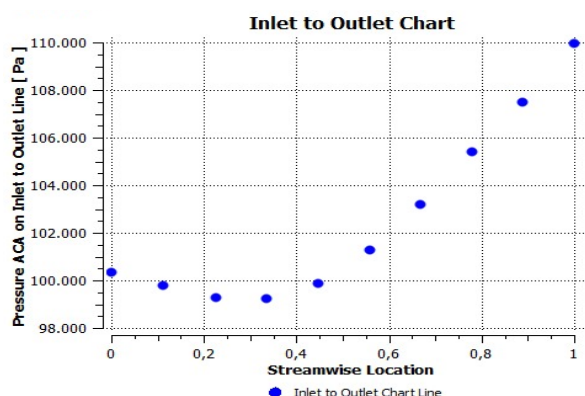


Figura 82-4: Presión a lo largo de líneas de corriente a lo largo del álabe

Fuente: ANSYS.

Realizado por: Acosta, C., Carrillo, D. 2020.

4.1.4 Análisis de la eficiencia del impeller

En el arranque de la simulación se puede observar que se tiene a una eficiencia al 100%, pero debido a varios parámetros que se requieren analizar, como el cambio de temperatura, presión total y estática, incluyendo al mismo diseño de los alabes que se puede mejorar el diseño como también mejorar la eficiencia, para nuestro análisis se realizó con un número de 300 iteraciones para realizar el cálculo y hasta llegar a una estabilidad su eficiencia baja hasta a un 68% aproximadamente, hasta llegar a un equilibrio del 83 -84 % , en la tabla 1-3 se realizó una análisis para determinar la eficiencia del impeller y se obtuvo como resultados un 86% de rendimiento, por lo que, se encuentra en un rango considerable, mejorando el diseño en los alabes que puede mejorar el rendimiento.

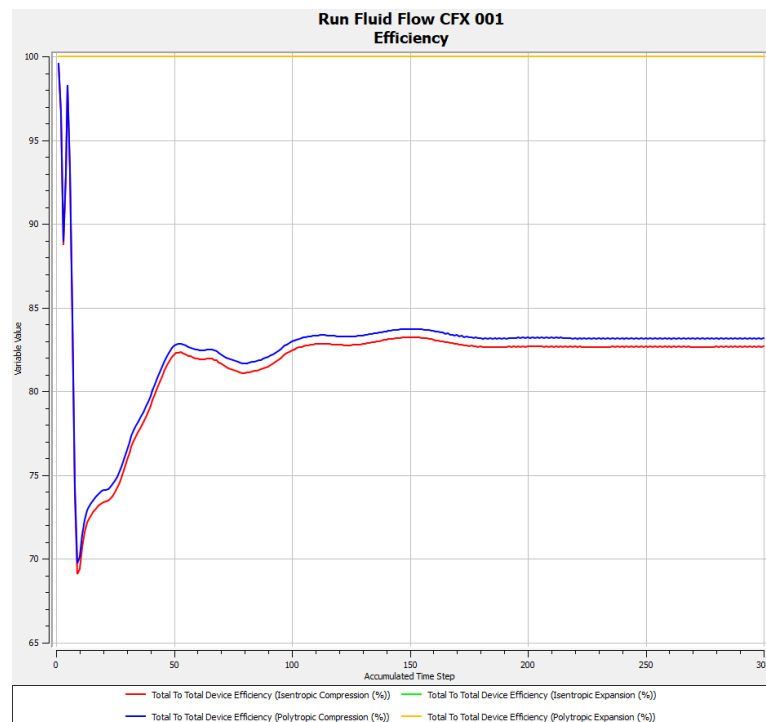


Figura 83-4: Eficiencia del impulsor

Fuente: ANSYS.

Realizado por: Acosta, C., Carrillo, D. 2020.

Tabla 1-4: Resultados de simulación

Descripción	Valor
Entrada de masa	0,17
Salida de masa	0,17
Rango de presión Pr	1,26
Rango de temperatura Tr	1,08
Eficiencia	86%

Fuente: ANSYS.

Realizado por: Acosta, C., Carrillo, D. 2020.

4.2 G- CODE

La generación del G-CODE se la realiza en la pestaña de diseño y a su vez seleccionando el post procesador a utilizar específicamente para una máquina de cinco ejes, el Post procesador para CNC de 5 ejes es mucho más complejos que los CNC de 3 ejes, pero para 5 ejes, en nuestro caso debe contar con el 3D de la máquina específica “ROMI 620-5X el cual nos facilita este paquetes es el fabricante de CNC multiejes” una vez que cuente con este requerimiento debe solicitar al proveedor de software CAM que diseñe un post procesador específico para el tipo de máquinas que disponemos. Una vez realizado esto emerge un cuadro de diálogo en el cual aparecerá el G CODE los cuales se los puede copiar en un bloc de notas con el fin de cambiar la extensión en la que se la procede a guardar como “NC” para que la máquina cinco ejes reconozca las operaciones que se van a realizar.

La simulación con máquinas es un paso fundamental antes de la fabricación en la máquina real, este procedimiento se lo hace para el mecanizado CNC, un tipo de configuración de multiejes es maquinas CNC 3+2, este tipo de CNC nos permite mecanizar con 3 ejes más 1 y bloquear el otro eje restante, en nuestra institución cuenta con una CNC 5 ejes simultánea, lo cual es más compleja el funcionamiento, por el fin de dar una solución se ha propuesto el mecanizado del impeller, para este procedimiento el software NX CAM nos brinda muchas facilidades para obtener este tipo de mecanizado multiejes, para ello se a realizado todos los parámetros de operaciones y ha procedido a realizar las respectiva simulación, una vez realizada el montaje de pieza o del material en bruto adecuado, como se muestra en la siguiente figura el montaje y la sección a mecanizar. Lo ideal sería realizar la simulación con el 3D de tipo de máquina que cuenta nuestra instrucción para que no haya problemas en la manufactura en el laboratorio CAD CAM.

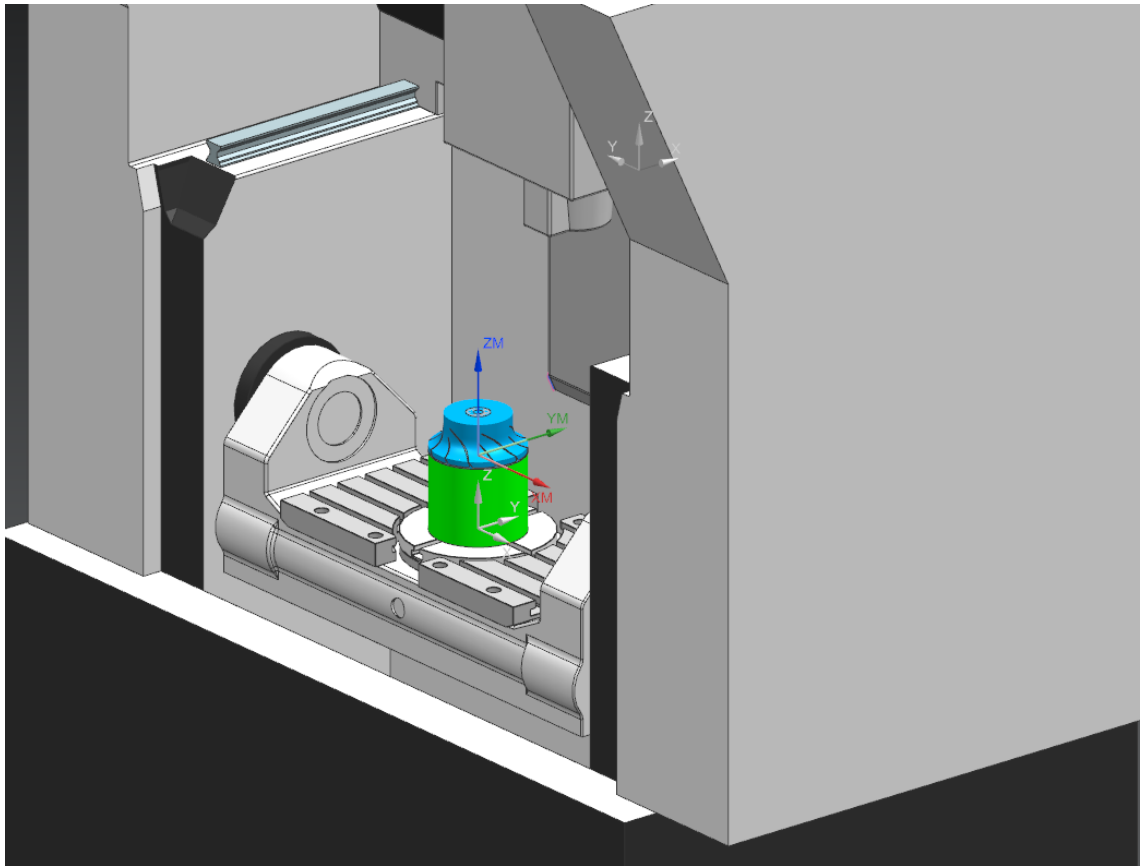


Figura 84-4: Montaje del material en bruto en la CNC 5 ejes.

Fuente: NX 12

Realizado por: Acosta, C., Carrillo, D. 2020.

A continuación, se puede visualizar como comienza el desbaste y en un cuadro de dialogo se puede visualizar las coordenadas de los 5 ejes disponibles de máquina eso nos ayuda a visualizar también el movimiento del eje B que tiene una rotación de -50° hasta 110° según las características de nuestra máquina y en la ilustración se muestra la inclinación del eje B. una parte vital si no se cuenta con mucha experiencia en este tipo de máquinas es correr la simulación en la maquina real pero en vacío, con el fin de constatar de manera real los movimiento, si por una razón inesperada se presenten movimientos bruscos y evitar colisiones, si se produce un daño por una colisión lo más recomendable de realizar el cambio de todo el bloque de la CNC no solo el elemento afectado.

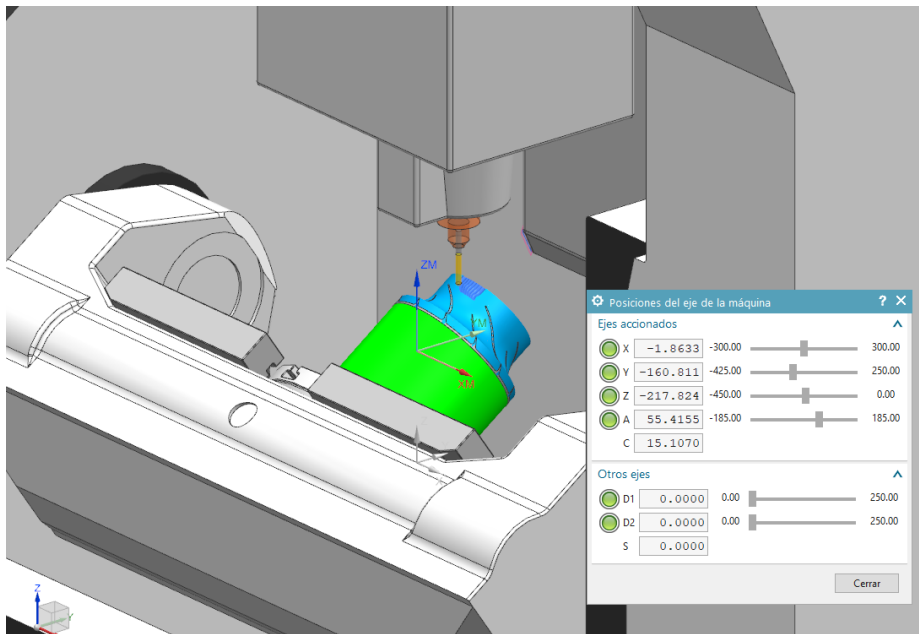


Figura 85-4: Operación de desbaste en la CNC 5 ejes.

Fuente: NX 12

Realizado por: Acosta, C., Carrillo, D. 2020.

La simulación nos muestra cómo sería la orientación de los ejes, para este tipo de máquina los ejes con más énfasis para ver su comportamiento, como se observa en la figura anterior y el actual eje B se mantiene su misma orientación esto se debe que el eje C como su rotación son los 360° y además las operaciones de desbastes está configurado para que siga una secuencia, terminado una sección del alabes y continúe al siguiente. Por tal motivo la inclinación del eje B va a ser hacia afuera, el material en bruto debe ser lo más alejado posibles del cero máquina por posibles colisiones entre el eje B y el portaherramientas. La sección de desbaste del cubo está por terminar si mayores complicaciones, la simulación con maquina consume mucho gasto computacional y también nos da una referencia del tiempo empleado en dichas operaciones.

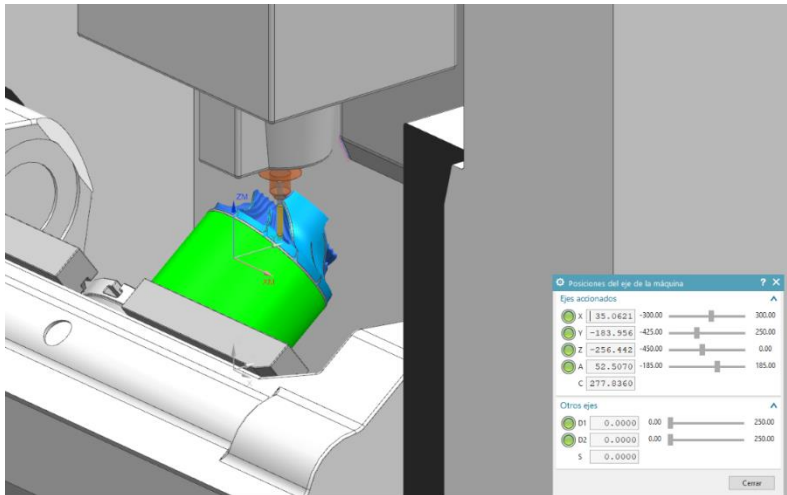


Figura 86-4: Terminado del desbaste del cubo en la CNC 5 ejes.

Fuente: NX 12

Realizado por: Acosta, C., Carrillo, D. 2020.

En esta ilustración se muestra el acabado de los alabes para ello también se utiliza la misma herramienta que se utilizó para el desbaste, pero con mayor revoluciones y menor profundidad de corte con el fin de tener un mejor acabado de la su superficie del alabe, los alabes tienen secciones muy delgadas de sus alabes. Para este caso la secuencia es dar acabado a todos los alabes principales y después ir por los alabes divisores y finalmente el, y con el otro cambio de herramienta se procederá a dar el redondeado de los alabes principal y divisores para dar por terminado la simulación de la manufactura del impeller si no se presentan alguna interferencia en este procedimiento de proceder a dar por validado el código NC, para poder arrancar la manufactura en forma real del impeller.

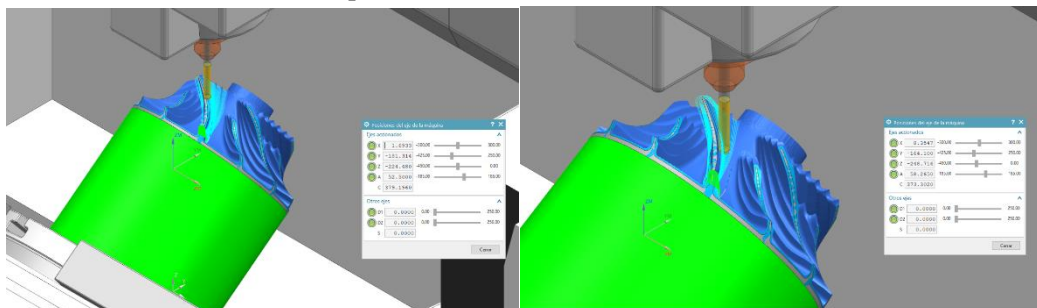


Figura 87-4: Simulación del acabado del alabe principal y alabe separador

Fuente: NX 12

Realizado por: Acosta, C., Carrillo, D. 2020.

CONCLUSIONES

- Durante el desarrollo de este trabajo de titulación fue indispensable comprender desde un inicio como se quiere realizar el diseño así como la simulación de pieza elegida mediante software CAD/CAM/CAE, analizando de forma analítica la geometría del impeller, con el fin de poder parametrizar dicho modelo, de igual manera comprender los requerimientos de diseño tales como los ángulos de entrada y salida de fluido del impeller, dimensiones del cubo, altura y número de los álabes principales y secundarios, con el fin de conseguir información fidedigna para la realización del diseño, así mismo para realizar el parametrizado de las simulaciones tanto CAM como CAE, así mismo se realizó un diseño previo en un software CAD avanzado en el cual se presenta mayores facilidades para este tipo de piezas con el fin de mecanizarlas.
- Con la ayuda del análisis que nos proporciona el software CAE en este caso se ha elegido ANSYS CFX, se pudo determinar así como comprobar el uso de los álabes separadores, de igual forma se hizo válida su geometría, debido a que estos son los encargados de corregir la distorsión en la trayectoria del fluido para esta se redireccione la velocidad lineal en el impeller, en el cual se observa que la velocidad mayor se presenta en los álabes separadores a la salida del fluido de tal manera estos protegen al impeller de algún daño al impeller por circulación del fluido a velocidad lineal.
- A lo largo el estudio se pudo constatar que existe un cambio o variación de temperatura, tanto en la entrada como en la salida del fluido que circula por el impeller, en los cuales podemos verificar que presenta una mayor temperatura a la salida del fluido en la parte inferior del impeller en el inicio de la geometría de los alabes principales así como los separadores, llegando a una temperatura máxima de 300 K, por lo que se puede concluir que el impeller centrífugo del compresor va a soportar dicha temperatura sin necesidad de deformación.
- Como se sabe el objetivo de un turbocompresor es aumentar la presión del fluido, con el fin de aumentar la velocidad así como eficiencia en el arranque del motor, esto depende de la relación de compresión presente en cada tipo de impeller, en este caso se ha optado por un modelo de seis álabes principales, así como el mismo número de separadores, mediante la simulación se pudo observar que existe una variación de presiones, las cuales van desde

141KPa en la entrada del impeller hasta 88,4 KPa en la salida del fluido como quedó mostrado mediante la simulación de ANSYS CFX, además de esto se pudo verificar la eficiencia del equipo tanto calculado en el software así como el que nos entrega el programa, teniendo de esta manera una eficiencia entre 84% a 86%, gracias a esto podemos ver que presenta una buena eficiencia lo cual lo hace viable para una futura construcción de este tipo de prototipo en masa para reducir costos así como mejorar al diseño actual que se presenta en el mercado.

- La manufactura mediante el software CAM nos brinda muchas facilidades para poder tener un mayor rendimiento en el proceso del mecanizado. Así mismo tener una mayor perspectiva de la manufactura de superficies complejas con es el caso del impeller que para este tipo de turbomáquinas la sincronización debe ser simultánea, gracias al software CAM se pudo conseguir el código final con la simulación con la cual se podría mecanizarla en una máquina CNC de cinco ejes, además se realizó la construcción del prototipo propuesto en este estudio de investigación mediante las herramientas y facilidades que nos presenta una impresión en 3D.

RECOMENDACIONES

- Para el mallado de la superficie cuando se trabaja en el software ANSYS se recomienda que el mismo debe ser homogéneo con el fin de que de esta manera se obtengan resultados verídicos y con los cuales se asemejen más a un caso real, pues el propósito de este tipo de simulaciones es el obtener un panorama más acertado de lo que pasa en la realidad con la función de este tipo de turbo compresores centrífugos.
- A lo largo de la realización de este estudio se encontró determinados inconvenientes, tales como, que para la fabricación de este tipo de impeller el cual es parte de un turbocompresor centrífugo es necesario contar con una máquina CNC de cinco ejes simultáneos pues la complejidad de la geometría requiere que todos los ejes se muevan paralelamente, además, se debe tener una precisión muy alta para los acabados de los álabes en las caras internas de la pieza para evitar de esta manera colisiones entre herramientas.
- También se encontró en el desarrollo de este trabajo de investigación que es necesario la utilización de software paramétrico 3D en la simulación del maquinado CAM el cual debe ser específico de la máquina CNC de cinco ejes la cual se va a utilizar con el fin de garantizar que la pieza con la que se va a trabajar no presente choques entre las herramientas, causando de esta manera posibles daños en la máquina antes mencionada, además que el operador deberá realizar varias simulaciones, la primera a bajas revoluciones para constatar que no exista saltos en la simulación de la herramienta y las posteriores simulaciones aumentando la velocidad con el fin de acortar el tiempo de uso de la máquina asegurando un buen acabado de la pieza a maquinar.
- Cabe recalcar como un dato de vital importancia que para el maquinado en una máquina CNC y en especial la de cinco ejes se debe trabajar con un post procesador específico para el modelo en el cual se va a realizar el trabajo ya que cada modelo tiene un post procesador específico el cual deberá ser brindado por el fabricante que demuestre la compatibilidad con el software CAM utilizado para la simulación en 3D en este caso se necesitaría un post procesador que sea compatible con el software NX del cual la Escuela Politécnica de Chimborazo posee la licencia legal.

GLOSARIO

Bladegen: Es una herramienta de ANSYS la cual crea automáticamente bocetos del álabe meridional para los contornos de la ruta de flujo principal (Fluent etl al., 2009).

Código G: Es un lenguaje de comando de máquina alfanumérico basado en ASCII que el controlador interpreta en movimientos y modos discretos (Acosta, 2017).

Curva de Bezzier: Es un término de diseño gráfico utilizado en imagen vectorial, el cual es un tipo de línea curva ideada por medio de un método de descripción matemática que permite definir las transiciones de las curvaturas. (Chang, K.H., 2014)

Factor de deslizamiento: Es un parámetro por considerar para el diseño de impulsores, para realizar un análisis correcto de la transferencia de energía entre el impulsor y el fluido (Dixon, 1988).

Flujo másico: Es el movimiento de la materia, se mide cuando se mueve a través de un límite determinado caracterizado por su área de sección (Cengel et al., 2006).

Global Size Factor: Es un método realiza un análisis global que define el tamaño total del mallado (Fluent etl al., 2009).

Hub finishing: permite aplicar trayectorias optimizadas especialmente diseñadas para el acabado de impellers hubs, así como también controlar de forma precisa la pasada lateral, el patrón de corte y el ángulo de la herramienta (Siemens, 2009).

Impeller: Es un tipo de rotor situado dentro de una tubería o un conducto y encargado de impulsar un fluido (Boyce, 2013).

Rest milling: automatiza la eliminación del material dejado por las operaciones previas, así como también optimiza la entrada de la herramienta en la pieza tratando de minimizar el tiempo de la herramienta en el aire. (Siemens, 2009)

Rodete: En una turbomáquina el único componente de incrementar la entalpia total del fluido de trabajo es el rodete. Este componente es el encargado de generar la energía necesaria para alcanzar las condiciones óptimas de trabajo (Nieto, 2019).

Sistema inductor: La función del inductor es incrementar el momento angular sin modificar el radio de rotación (Boyce, 2013).

Target Passage Mesh Size: Es un método en el cual se establece un número limitado de nodos en el mallado (Fluent etl al., 2009).

Topología: Es una configuración de bloques que actúa como una referencia para posicionar los elementos de mallas (Fluent etl al., 2009).

Trafoof: Cancela todas las transformaciones generadas por la función TRAORI. (ROMI, 2009).

Traori: Esta función trabaja en la aplicación de la industria espacial, moldes y matrices que necesitan familiarizarse con principios básicos de multiejes (ROMI, 2009)

Turbocompresor: Son turbomáquinas que sirven para comprimir un gas para aumentar la potencia de un motor de combustión interna (Miller, 2008).

BIBLIOGRAFÍA

- ACOSTA GOMEZ, Geovanni Israel.** Modelado CAD-CAM y fabricación de juguete utilizando una máquina CNC de 5 ejes que formará parte del laboratorio de CAD-CAM. (Trabajo de titulación) (Pregrado). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Riobamba Ecuador. 2017.
- AUNGIER, R.H.** *Centrifugal Compressors. A Strategy for Aerodynamic Design and Analysis.* 1ª ed. New York -EE.UU: ASME PRESS, 2000. ISBN 9788578110796.
- BOYCE, M.P.** *Centrifugal Compressors, A Basic Guide.* 2ª ed. Oklahoma -EE.UU: PennWell Corporation, 2013. ISBN 9780878148011.
- BROWN, R.** *Compressors: Selection and Sizing.* 3ª ed. Michigan -EE.UU: Elsevier Science & Technology Books, 2005. ISBN 0750675454.
- CASTILLO, A.** *Desarrollo del proceso de manufactura de un impeller en un centro de mecanizado multieje empleando el software NX CAM.* 2005
- CENGEL, Y; et al.** *Mecánica de fluidos: Fundamentos y aplicaciones.* New York -EE.UU: McGraw-Hill Interamericana, 2006.
- CHANG, K.H.** *Product design modeling using CAD/CAE: the computer aided engineering design series.* 1ª ed. New York - EE.UU: Academic Press, 2014
- DÍEZ, P.** *Compresores.* 1ª ed. Valencia - España. 2005
- DIXON, S.L.** *Fluid Mechanics & Thermodynamics of Turbomachinery.* 4ª ed. Oxford -EE.UU: Pergamon Press Ltd, 1988.
- DUDA, T; & RAGHAVAN, L.** "3D Metal Printing Technology". *IFAC-PapersOnLine* [en línea], 2016, 49 (29), pp. 103–110. [Consulta: 20 enero 2021]. ISSN 24058963. Disponible en: DOI 10.1016/j.ifacol.2016.11.111. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.11.111>.
- GAJA, V & KORENY, A.** *Proceedings of the Woodworking.* 4ª ed. Prague: University Zagreb, 2011. ISBN 9788021321823.
- GORDILLO, F. & SÁNCHEZ, A.** Diseño y construcción de un banco didáctico de un motor repotenciado con turbo e inyección de gasolina. (Trabajo de titulación) (Posgrado). Universidad del Azuay. Cuenca Ecuador. 2006

- GUAITA, José & SARANGO, Jorgue.** Selección e implementación de un sistema de sobrealimentación, para un vehículo Hyundai h100 motor diésel 2.6. (Trabajo de titulación) (Pregrado). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Riobamba Ecuador. 2013.
- GUTIÉRREZ, Macial.** Modelado de un tornillo sin fin cónico y construcción mediante una máquina CNC de 4 ejes didáctica. (Trabajo de titulación) (Pregrado). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Riobamba Ecuador. 2017.
- HANLON, P.** *COMPRESSOR HANDBOOK*. 3ª ed. McGraw-Hill, 2001. ISBN 0070260052.
- HOOD, P; & FLOYD, J.** *Build Your Own CNC Machine* [en línea]. 1ª ed. Indiana –EE.UU: Apress, 2017. ISBN 9781430224891. [Consulta: 20 enero 2021]. Disponible en: <https://grabcad.com/library/cnc-machine-bed-1>.
- IBAMA - MANUAL DO IUSUÁRIO - ROMI DCM 620- 5X.** Manual do usuário. 2007.
- LÓPEZ, J.** *Estudio de un Turbofan*. 2012.
- MATAIX, C.** *Turbomáquinas térmicas*. 3ª ed. España: Dossat. 1991
- MILLER, J.** *Turbo: Real World High-Performance Turbocharger Systems* [en línea]. CarTech Inc, 2008. ISBN 1932494294, 9781932494297. [Consulta: 20 enero 2021]. Disponible en: www.carttechbooks.com.
- NIETO, G.** Análisis comparativo de los compresores. (Trabajo de titulación) (Pregrado). Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Sevilla. Sevilla - España. 2019.
- OVERBY, A.** *CNC Machining Handbook*. 1ª ed. New York- EE.UU: McGraw-Hill, 2011. ISBN 5856420187.
- SHAH, J. & MÄNTYLÄ, M.** *Parametric and feature-based CAD/CAM: concepts, techniques, and applications*. 1ª ed. New York- EE.UU: John Wiley & Sons, 1995
- SIEMENS.** *Soluciones inteligentes para Máquinas Herramienta*. Buenos Aires -Argentina. 2009
- SMID, P.** *A Comprehensive Guide to Practical CNC Programming*. 1ª ed. New York –EE.UU: Industrial Press Inc. 2003
- TORRES, A.** *Banco de pruebas para un turbocompresor centrífugo Holset HT3B*. 2012
- WU, C.** “Arbitrary surface flank milling of fan, compressor, and impeller blades” *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power* [en línea], 1995, (United States), pp 534-539. [Consulta: 20 enero 2021]. ISSN 15288919. Disponible en: DOI 10.1115/1.2814127. 1995

ANEXOS

ANEXO A: G-CODE

```
1 N60 DEF REAL _camtolerance
2 N70 DEF REAL _X_HOME, _Y_HOME, _Z_HOME, _B_HOME, _C_HOME
3 N80 DEF REAL _F_CUTTING, _F_ENGAGE, _F_RETRACT
4 N90 ;|
5 N100 G40 G17 G710 G94 G90 G60 G601 FNORM
6 N110 ;Start of Path
7 N120 ;
8 N130 ;TECHNOLOGY: MILL_ROUGH
9 N140 ;TOOL NAME : BALL_MILL_7
10 N150 ;TOOL TYPE : Milling Tool-Ball Mill
11 N160 ;TOOL DIAMETER : 7.000000
12 N170 ;TOOL LENGTH : 70.000000
13 N180 ;TOOL CORNER RADIUS: 3.500000
14 N190 ;
15 N200 ;Intol : 0.080000
16 N210 ;Outtol : 0.080000
17 N220 ;Stock : 1.000000
18 N230 _camtolerance=.16
19 N240 _X_HOME=0.0 _Y_HOME=0.0 _Z_HOME=0.0
20 N250 _B_HOME=0 _C_HOME=0
21 N260 ;
22 N270 ;Operation : MULTI_BLADE_ROUGH
23 N280 ;
24 N290 TRAFOOF
25 N300 SUPA G0 Z=_Z_HOME D0
26 N310 SUPA G0 X=_X_HOME Y=_Y_HOME B=_B_HOME C=_C_HOME D1
27 N320 ;First Tool
28 N330 T="BALL_MILL_7"
29 N340 M6
30 N350 MSG("MILL_ROUGH")
31 N360 TRAFOOF
32 N370 SUPA G0 Z=_Z_HOME D0
33 N380 SUPA G0 X=_X_HOME Y=_Y_HOME B=_B_HOME C=_C_HOME D1
34 N390 ;Initial Move
35 N400 CYCLE832(_camtolerance,0,1)
36 N410 TRAORI
37 N420 G54
38 N430 ORIWKS
39 N440 ORIXES
40 N450 G0 B53.8887 C27.60057
41 N460 G0 X57.16228 Y-88.76717 Z88.73625 S800 D1 M3
42 N470 ;Approach Move
43 N480 X38.01475 Y-52.14221 Z58.58676
44 N490 ;Engage Move
45 N500 G1 X37.75016 Y-51.80226 Z58.36288 F250.
46 N510 X37.36017 Y-51.52636 Z58.27242
47 N520 X36.90743 Y-51.34841 Z58.30025
```

```

350522 N3505270 X-20.34742 Y-90.7      Z14.5888
350523 N3505280 X-20.4608 Y-91.1      Z15.28269
350524 N3505290 X-20.7898 Y-91.74     Z16.67302
350525 N3505300 X-21.0234 Y-92.06583 Z17.34792
350526 N3505310 X-21.32086 Y-92.40598 Z17.98747
350527 N3505320 ;Departure Move
350528 N3505330 G0 X-28.15337 Y-99.62855 Z30.48662
350529 N3505340 ;End of Path
350530 N3505350 TRAFOOF
350531 N3505360 SUPA G0 Z=_Z_HOME D0
350532 N3505370 SUPA G0 X=_X_HOME Y=_Y_HOME B=_B_HOME C=_C_HOME D1
350533 N3505380 CYCLE832 ()
350534 N3505390 M5
350535 N3505400 ;Start of Path
350536 N3505410 ;
350537 N3505420 ;TECHNOLOGY: MILL_FINISH
350538 N3505430 ;TOOL NAME : BALL_MILL_7
350539 N3505440 ;TOOL TYPE : Milling Tool-BALL Mill
350540 N3505450 ;TOOL DIAMETER      : 7.000000
350541 N3505460 ;TOOL LENGTH          : 70.000000
350542 N3505470 ;TOOL CORNER RADIUS: 3.500000
350543 N3505480 ;
350544 N3505490 ;Intol      : 0.030000
350545 N3505500 ;Outtol     : 0.030000
350546 N3505510 ;Stock      : 0.000000
350547 N3505520 _camtolerance=.06
350548 N3505530 _X_HOME=0.0 _Y_HOME=0.0 _Z_HOME=0.0
350549 N3505540 _B_HOME=0 _C_HOME=0
350550 N3505550 ;
350551 N3505560 ;Operation : SPLITTER_FINISH
350552 N3505570 ;
350553 N3505580 MSG("MILL_FINISH")
350554 N3505590 ;First Move
350555 N3505600 CYCLE832(_camtolerance,0,1)
350556 N3505610 TRAORI
350557 N3505620 G54
350558 N3505630 ORIWKS
350559 N3505640 ORIAxes
350560 N3505650 G0 B46.2581 C53.00094
350561 N3505660 G0 X76.52083 Y-69.73538 Z79.75435 S1600 D1 M3
350562 N3505670 ;Approach Move
350563 N3505680 X49.13364 Y-49.09836 Z46.93614
350564 N3505690 ;Engage Move
350565 N3505700 G1 X48.72597 Y-48.71257 Z46.39475 F250.
350566 N3505710 X48.39262 Y-48.24908 Z45.8631
350567 N3505720 X48.1175 Y-47.72435 Z45.35538

```

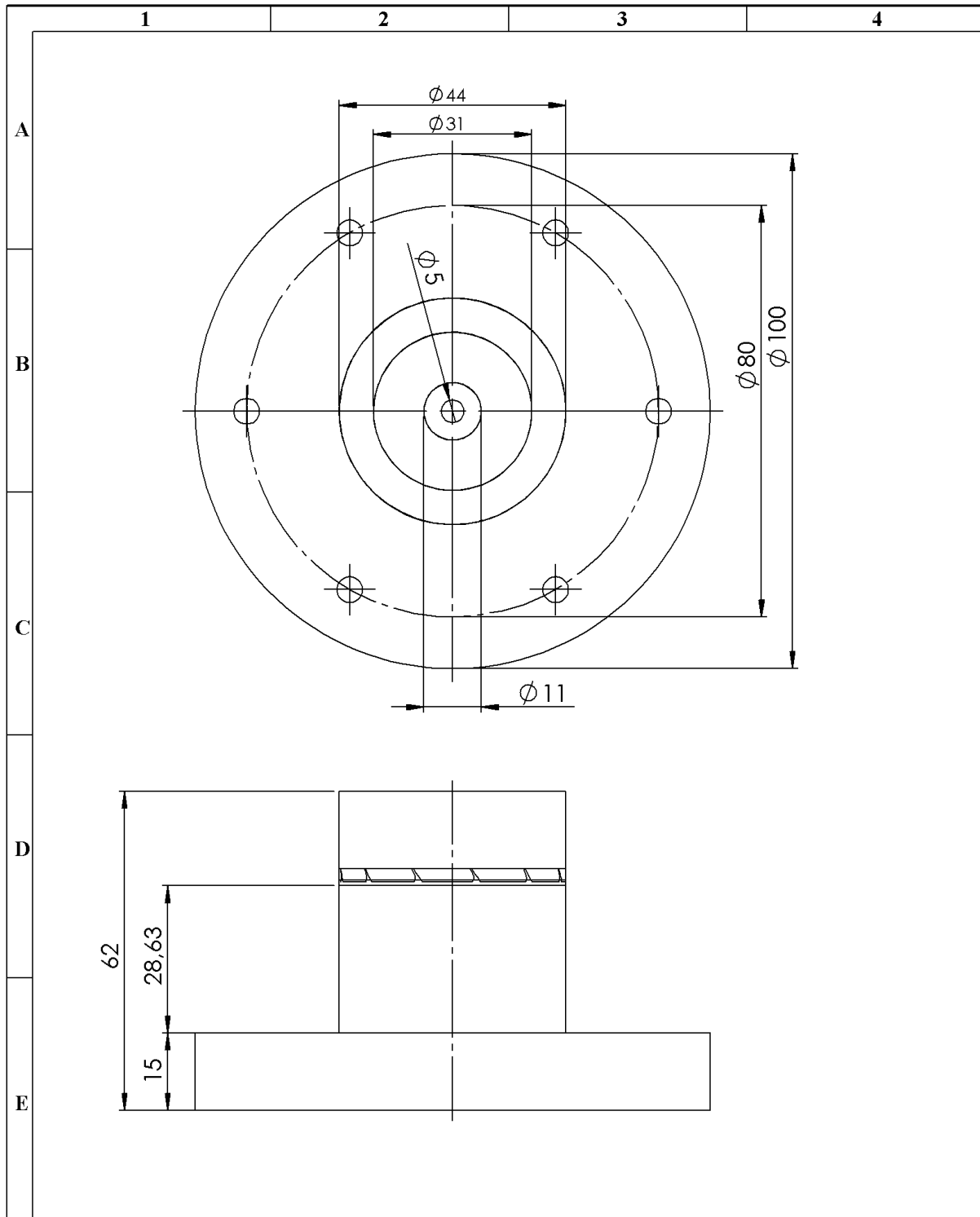


```

1015514 N10155190 X24.61491 Y-82.40614 Z11.13571 B29.40246 C-1.0625
1015515 N10155200 X24.68973 Y-82.55286 Z11.13734 B29.34795 C-1.00799
1015516 N10155210 X24.76447 Y-82.69961 Z11.13897 B29.29345 C-.95349
1015517 N10155220 X24.83926 Y-82.84634 Z11.1406 B29.23895 C-.89899
1015518 N10155230 X24.87608 Y-82.91849 Z11.1414 B29.21214 C-.87218
1015519 N10155240 X24.94748 Y-83.05621 Z11.14293 B29.1608 C-.82084
1015520 N10155250 X25.01898 Y-83.19389 Z11.14447 B29.10946 C-.7695
1015521 N10155260 X25.09057 Y-83.33153 Z11.146 B29.05811 C-.71815
1015522 N10155270 X25.17662 Y-83.49665 Z11.14785 B28.99649 C-.65653
1015523 N10155280 X25.24844 Y-83.63421 Z11.14939 B28.94514 C-.60518
1015524 N10155290 X25.32036 Y-83.77173 Z11.15093 B28.89378 C-.55382
1015525 N10155300 X25.39238 Y-83.90921 Z11.15247 B28.84242 C-.50246
1015526 N10155310 X25.46451 Y-84.04665 Z11.15401 B28.79106 C-.4511
1015527 N10155320 X25.53673 Y-84.18405 Z11.15556 B28.73969 C-.39973
1015528 N10155330 X25.62353 Y-84.34889 Z11.15741 B28.67804 C-.33808
1015529 N10155340 X25.69597 Y-84.4862 Z11.15896 B28.62667 C-.28671
1015530 N10155350 X25.76852 Y-84.62348 Z11.16051 B28.57529 C-.23533
1015531 N10155360 X25.84116 Y-84.76072 Z11.16206 B28.5239 C-.18394
1015532 N10155370 X25.91391 Y-84.89792 Z11.16361 B28.47252 C-.13256
1015533 N10155380 X25.98676 Y-85.03508 Z11.16516 B28.42113 C-.08117
1015534 N10155390 X26.07431 Y-85.19962 Z11.16703 B28.35945 C-.01949
1015535 N10155400 X26.14738 Y-85.33669 Z11.16858 B28.30806 C.0319
1015536 N10155410 X26.22055 Y-85.47372 Z11.17014 B28.25665 C.08331
1015537 N10155420 X26.29382 Y-85.61072 Z11.1717 B28.20525 C.13471
1015538 N10155430 ;Retract Move
1015539 N10155440 X26.54495 Y-86.01042 Z11.23875
1015540 N10155450 X26.82793 Y-86.34394 Z11.42894
1015541 N10155460 X27.11127 Y-86.60224 Z11.71387
1015542 N10155470 X27.37593 Y-86.80149 Z12.05871
1015543 N10155480 X27.61457 Y-86.96291 Z12.44064
1015544 N10155490 X27.82387 Y-87.1044 Z12.847
1015545 N10155500 X28.00053 Y-87.24066 Z13.2703
1015546 N10155510 X28.13932 Y-87.38516 Z13.70478
1015547 N10155520 X28.23191 Y-87.55167 Z14.14351
1015548 N10155530 X28.26627 Y-87.75482 Z14.57489
1015549 N10155540 ;Departure Move
1015550 N10155550 G0 X28.29043 Y-98.02945 Z33.73282
1015551 N10155560 ;End of Path
1015552 N10155570 TRAF00F
1015553 N10155580 SUPA G0 Z=_Z_HOME D0
1015554 N10155590 SUPA G0 X=_X_HOME Y=_Y_HOME B=_B_HOME C=_C_HOME D2
1015555 N10155600 CYCLE832 ()
1015556 N10155610 M5
1015557 N10155620 ;End of Program
1015558 N10155630 M30
1015559

```

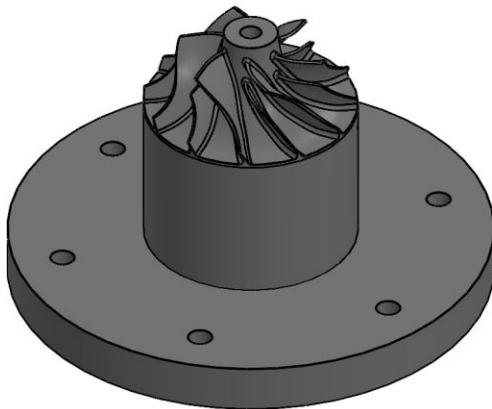
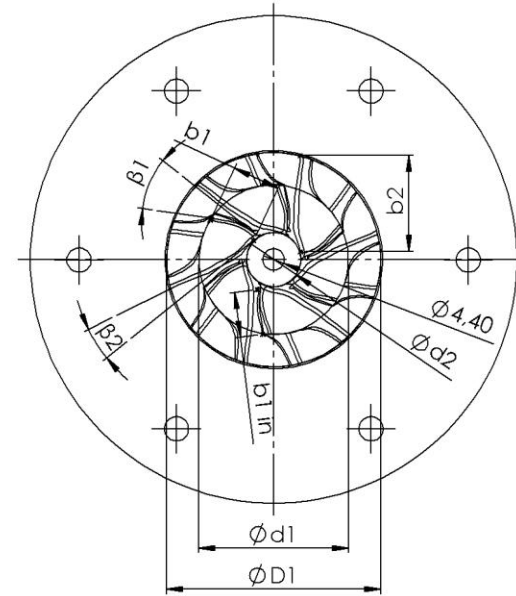
ANEXO B: PLANOS DE CONSTRUCCIÓN DEL IMPELLER



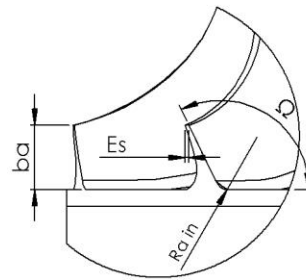
Nº. Lámina: 1 de 2		Nº. Hojas: 2		Sustitución:		Codificación: FM-EIM-MER-D-001-03-2021		ESPOCH FACULTAD DE MECÁNICA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA			
Email: Teléfonos:						IMPELLER					
Datos		Nombre		Firma							
Proyectó		Carrillo Dario				2021/03/01			±0.3 [mm]	1:1	
Dibujó		Acosta Cristian				2021/03/01		ESTE DOCUMENTO ES PROPIEDAD INTELLECTUAL EXCLUSIVA DE: A.S. Y I.T. CUALQUIER USO Y REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL NO AUTORIZADA CONSTITUYE VIOLACIÓN DE LOS DERECHOS DEL AUTOR PENADA POR LA LEY			
Revisó		Ing. Escobar M.				2021/03/01					
Aprobó		Ing. Escobar M.				2021/03/01		Nombre de archivo: Impeller.sldprt			

Dimensiones generales			
Alturas, d1 D1		Ángulos y Ra	
H	18.37 mm	$\beta 1$	30.42°
ba	4 mm	$\beta 2$	12.12°
$\phi d1$	30.71 mm	Ra	2.47 mm
$\phi D1$	44 mm	Rm	220 mm
$\phi d2$	11.2 mm		

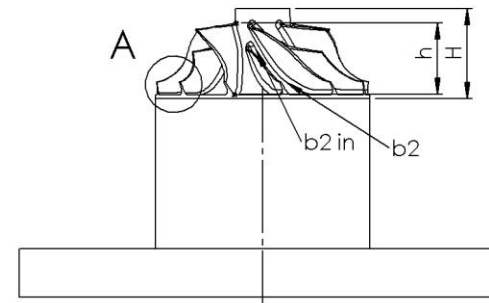
ÁLABE					
Número de álabes	6	Características		Dimensiones del álabes	
φ	60°	Ω	115°	b1	9.85 mm
		Ra	2.47 mm	b2	26.11 mm
		Es	1.25 mm		
		Alabe Interior			
		Ω	115° ¹	b1 in	9.26 mm
		Ra in	2.47 mm	b2 in	20.99 mm
		Es in	1.25 mm		



IMPELLER
ESCALA 1: 1



DETALLE A
ESCALA 5: 1



N°. Lámina: 2 de 2	N°. Hojas: 2	Sustitución:	Codificación: FM-EIM-MER-D-001-03-2021	ESPOCH FACULTAD DE MECÁNICA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA				
Email: Teléfonos:			Denominación: IMPELLER ISOMETRICO		Peso [Kg]	Tolerancia	Escala	Registro
Datos	Nombre	Firma	Fecha			±0.3 [mm]	1:2	
Proyectó	Carrillo Dario		2021/03/01					
Dibujó	Acosta Cristian		2021/03/01					
Revisó	Ing. Escobar M.		2021/03/01	Materiales: SEGUN DISEÑO		ESTE DOCUMENTO ES PROPIEDAD INTELLECTUAL EXCLUSIVA DE A.S. Y I.T. CUALQUIER USO Y REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL NO AUTORIZADA CONSTITUYE VIOLACIÓN DE LOS DERECHOS DEL AUTOR PENADA POR LA LEY		
Aprobó	Ing. Escobar M.		2021/03/01	Nombre de archivo: Impeller.sldprt				

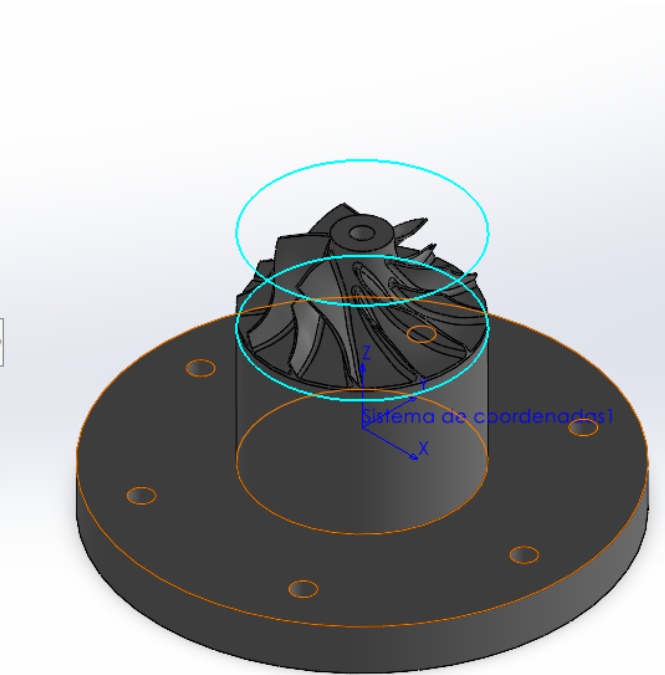
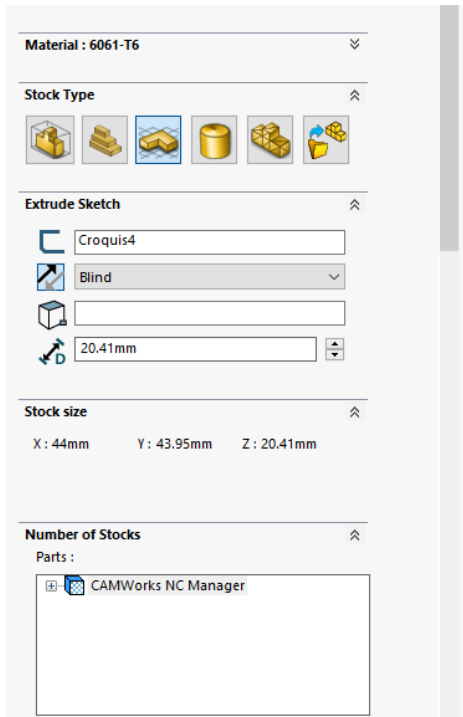
ANEXO C: MODELO DE IMPELLER IMPRESO EN 3D

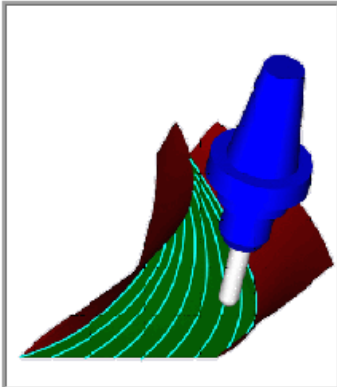


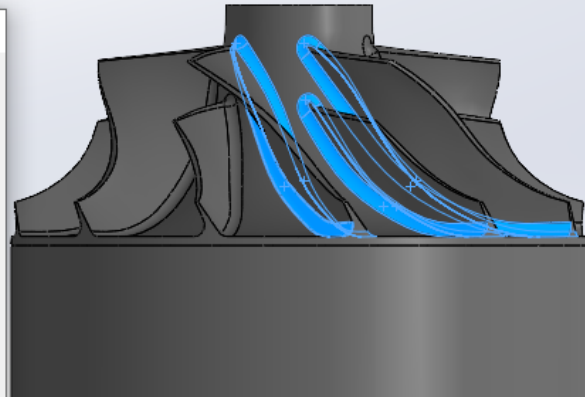
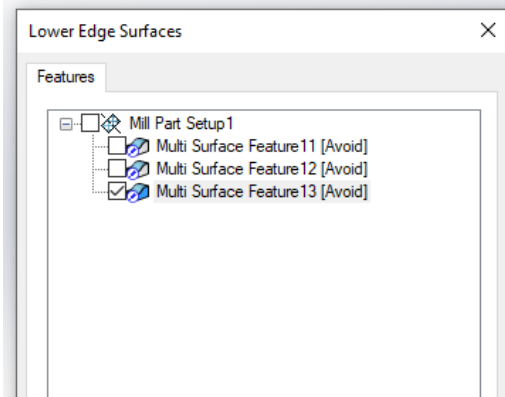
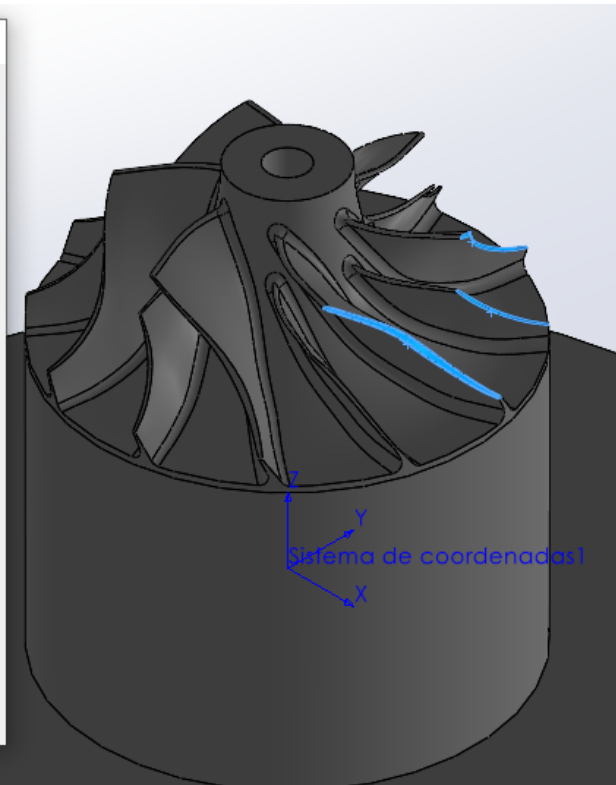
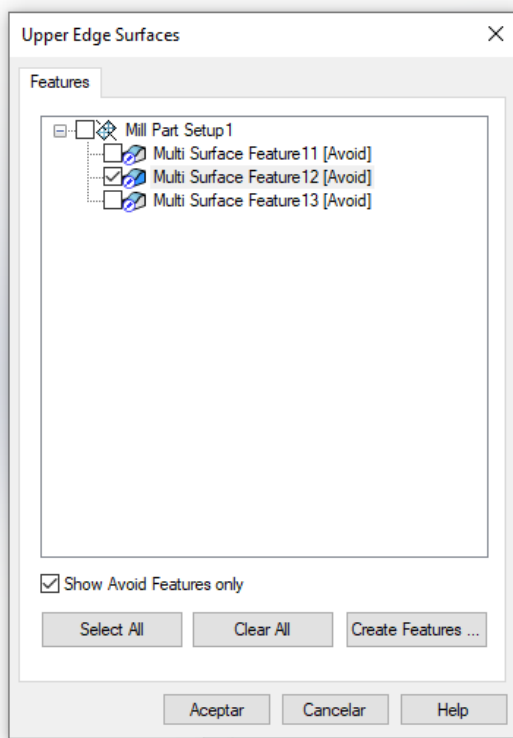


ANEXO D: OTRAS ALTERNATIVAS DE MODELADO CAM

Alternativa 1.



Statistics		Axis Control		Finish	Roughing		Rest	
Tool	F/S	Pattern	Entry/Retract	Links	Gouge Checking	Advanced	Posting	
Method : Milling								
Pattern Pattern : Flowline Between Surface Cut angle (XY) : 0deg Parallel Cut angle (Z) : -90deg Constant Z Upper... Lower... <input type="checkbox"/> Generate tool path only at front side Upper tangent angle : 0deg Lower tangent angle : 0deg								
Direction Pattern : Zigzag Order : Sequential Cut direction : Climb Machine by : Lane <input type="checkbox"/> Blend spiral along distance 0mm <input type="checkbox"/> Reverse stepover <input type="checkbox"/> Close first cut <input type="checkbox"/> Maintain cutting direction <input type="checkbox"/> Close last cut								
Limits Method : Start and End At Exact Surface E Number of cuts : 1								
								
					Surface finish Max. stepover : 1mm Max scallop : 0.09mm			
					Start hint <input type="checkbox"/> Use start hint <input checked="" type="checkbox"/> X : 0mm <input type="checkbox"/> Y : 0mm <input type="checkbox"/> Z : 0mm Rotate next cut by : 0deg			
					Margins Start margin : 0mm End margin : 0mm Edge margin : 0.02mm <input type="checkbox"/> Add internal tool radius			



Operation Parameters



Tool	F/S	Pattern	Entry/Retract	Links	Gouge Checking	Advanced	Posting
Statistics		Axis Control		Finish		Roughing	Rest

Number of axis

Number of axis :

Rotate about :

Max. angular step :

Cutting direction tilt options

Tool axis will be :

Allow flipping side direction

Lead/lag angle :

Side tilt angle :

Side tilt strategy :

Gradual lead angle :

Gradual side tilt angle :

Options

Limit tool angle

Contact point :

Common direction

Type :

Tilt Lines...

Tilt Curve...

Define tilt point

X :

Y :

Z :

Define axis line

Start X :

Start Y :

Start Z :

End X :

End Y :

End Z :

Operation Parameters



Tool	F/S	Pattern	Entry/Retract	Links	Gouge Checking	Advanced	Posting
Statistics		Axis Control		Finish	Roughing		Rest

Multi passes

Depth processing : By Region

Roughing	Number : 1
Spacing : 0mm	

Finishing	Number : 0
Spacing : 0mm	

Gradual machining angle XY change : 0deg

Axial cut depths

Depth processing : By Region

Apply depth to : Whole toolpath

Roughing	Number : 1
Spacing : 0mm	

Finishing	Number : 0
Spacing : 0mm	

Tangent ramping

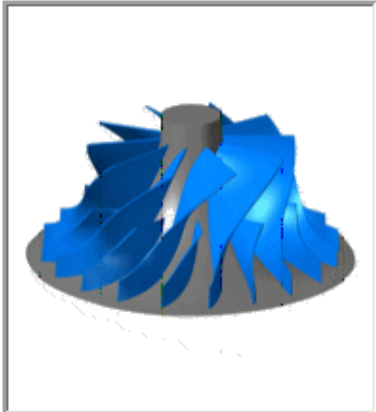
Plunge

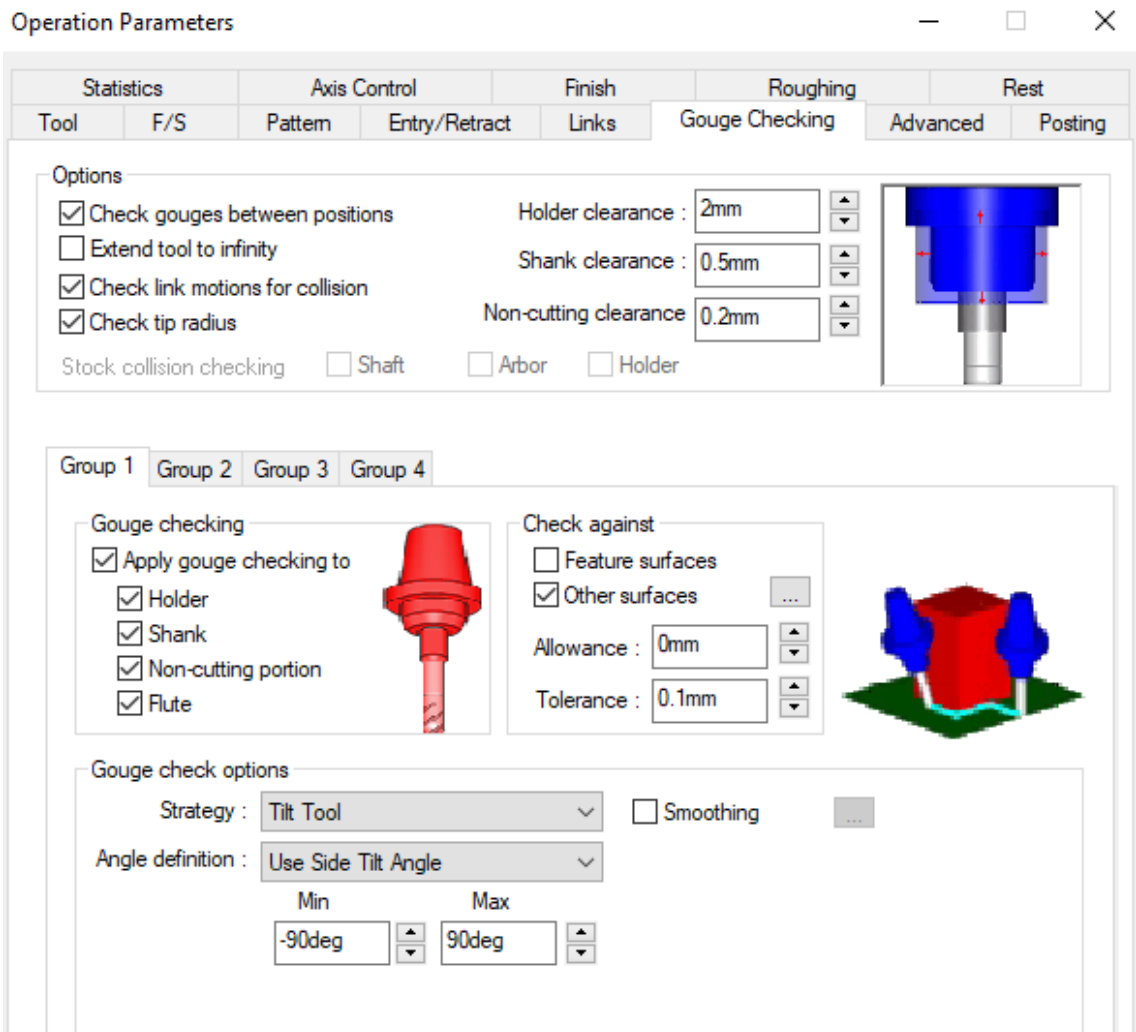
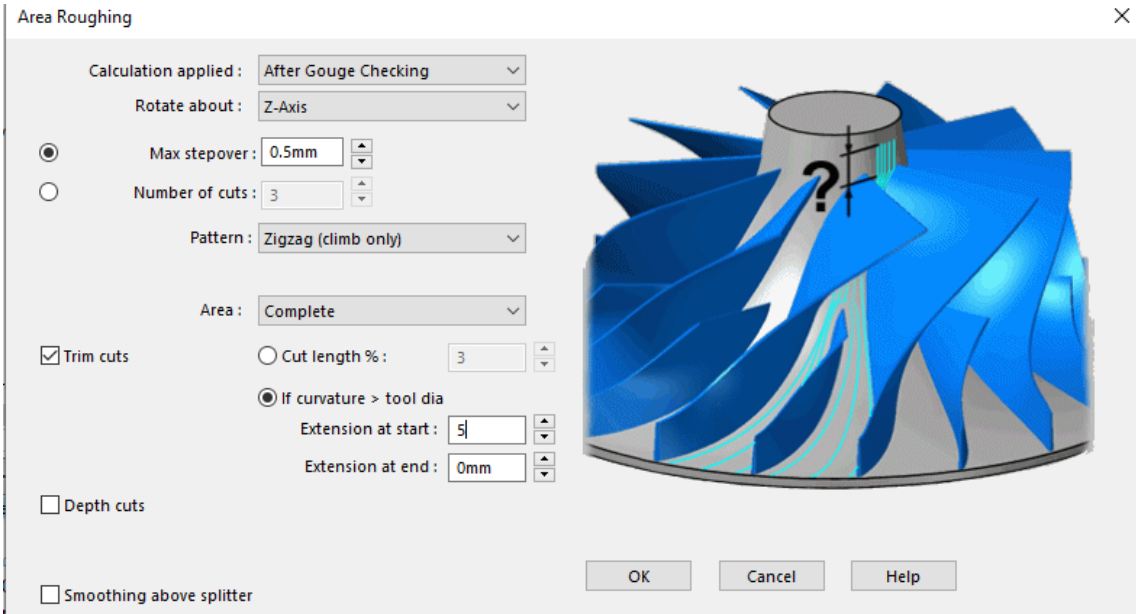
Step length : 5mm Plunge height : 5mm

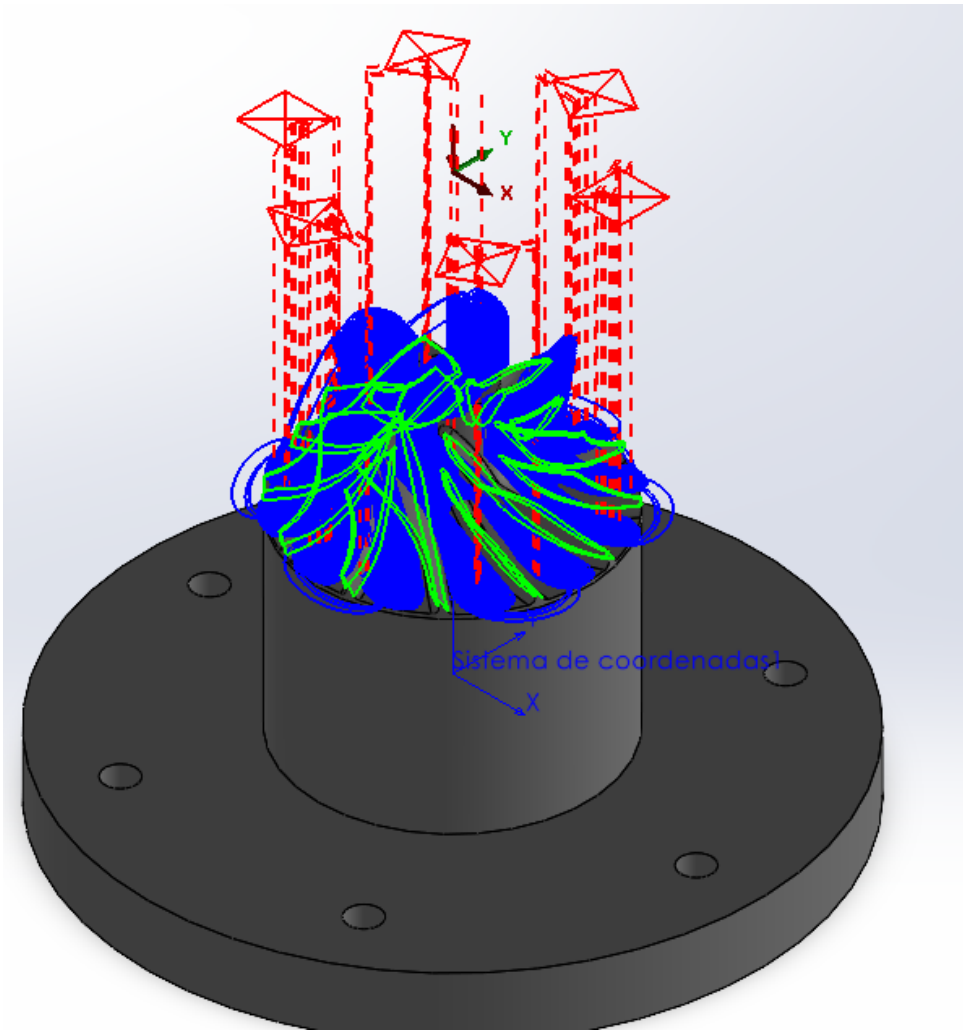
Slide length : 0mm

Connect by shortest distance

Area roughing

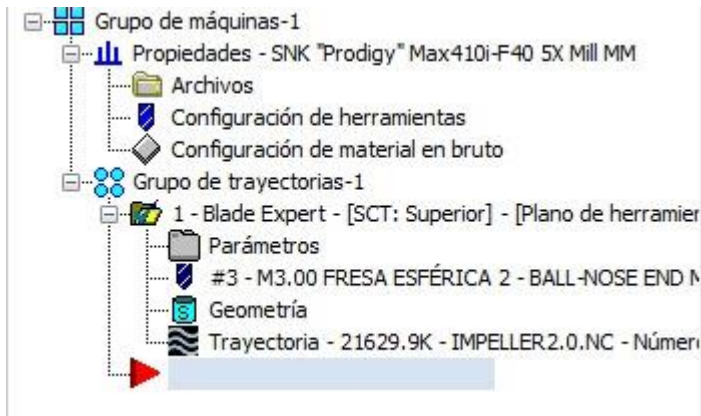






N18613 X11.633 Y-11.354
N18614 X11.019 Y-11.161
N18615 X10.890 Y-11.183
N18616 X10.831 Y-11.300
N18617 Y-11.419
N18618 X10.895 Y-11.578
N18619 X11.633 Y-12.344
N18620 X12.436 Y-13.129
N18621 X13.238 Y-13.877
N18622 X13.405 Y-14.040
N18623 X14.262 Y-14.842
N18624 X14.843 Y-15.430
N18625 X14.926 Y-15.509
N18626 X15.264 Y-15.645
N18627 X15.467
N18628 Z-23.159
N18629 G0 Z50.000
N18630 S2500
N18631 X11.481 Y53.028 B-79.2996 A-120.1429
N18632 Y30.858
N18633 G1 Y30.108 Z1.719 F250.000
N18634 X11.560 Z1.606
N18635 X11.627 Z1.447
N18636 X11.657 Y30.107 Z1.277
N18637 X11.646 Y30.106 Z1.104
N18638 X11.597 Y30.104 Z.938
N18639 X11.510 Y30.102 Z.789
N18640 X11.395 Y30.101 Z.659
N18641 X10.882 Y30.247 Z.632 B-80.7775 A-120.4908
N18642 X10.788 Y30.273 Z.624 B-81.0943 A-120.5957
N18643 X9.831 Y30.522 Z.496 B-83.7314 A-121.2327
N18644 X8.897 Y30.736 Z.276 B-86.2698 A-121.9217
N18645 X7.990 Y30.916 Z-.025 B-88.7118 A-122.6519
N18646 X7.515 Y30.999 Z-.233 B-89.9270 A-123.0431
N18647 X6.896 Y31.098 Z-.656 B-91.4867 A-123.7624
N18648 X6.298 Y31.175 Z-1.115 B-92.9883 A-124.5005
N18649 X5.085 Y31.256 Z-2.651 B-95.9519 A-126.8904
N18650 X4.820 Y31.246 Z-3.155 B-96.5278 A-127.6214
N18651 X4.014 Y31.108 Z-5.158 B-98.0686 A-130.4506
N18652 X3.894 Y31.072 Z-5.488 B-98.2857 A-130.9125
N18653 X3.788 Y31.033 Z-5.825 B-98.4564 A-131.3820
N18654 X3.221 Y30.725 Z-7.863 B-99.3674 A-134.2988
N18655 X2.984 Y30.547 Z-8.760 B-99.7321 A-135.5821
N18656 X2.802 Y30.381 Z-9.520 B-99.9788 A-136.6706
N18657 G0 Y30.381
N18658 X-2.340 Y29.863 B79.3919 A-40.3836
N18659 G1 Y29.863 Z11.537
N18660 X-2.186 Y29.654 Z12.230 B79.1887 A-39.3611
N18661 X-1.929 Y29.260 Z13.425 B78.8606 A-37.5744
N18662 X-1.536 Y28.608 Z15.185 B78.3078 A-34.8974
N18663 X-1.301 Y28.132 Z16.324 B78.0399 A-33.1428
N18664 X-.942 Y27.327 Z18.076 B77.6760 A-30.4230
N18665 X-.607 Y26.412 Z19.812 B77.4043 A-27.6427

Alternativa 2



Tipo de trayectoria

- Herramienta
 - Porta-herramienta**
- Material en bruto
- Patrón de corte
- Definición de pieza
- Control del eje de la herra
- Vinculación
- Aristas
- Miscelaneos
- Configuración adicional

Configuración de vista rápida

Herramienta	BALL-NOSE ...
Diámetro de...	3
Radio de es...	1.5
Velocidad d...	3946.92
Velocidad d...	9779
Refrigerante	Desactivado
Longitud de...	40
Compensaci...	3
Compensaci...	3
PlanoC/Pla...	Superior
Combinació...	Default (1)

[porta-herramienta predetermin ^

- B4K5-0020
- B2C3-0016
- B2C3-0020
- B2C3-0020
- B2C3-0032
- B2C3-0032
- B2C4-0011
- B2C4-0016
- B2C4-0020
- B2C4-0032
- B2C4-1000
- B2E4-0125
- B2E4-0187

Abrir bibl. Nueva bibl.

Guardar bibl. Nuevo porta-h.

Biblioteca: Mill_mm.tooldb

* = Indica que el porta-herramienta no se guardó en la biblioteca actual

Propiedades de ensamblaje

Proyección de la herramienta:

Nombre de ensamblaje:

Tipo de trayectoria
 Herramienta
 Porta-herramienta
 Material en bruto
 Patrón de corte
 Definición de pieza
 Control del eje de la herra
 Vinculación
 Aristas
 Miscelaneos
 Configuración adicional

Configuración de vista rápida

Herramienta BALL-NOSE ...
 Diámetro de... 3
 Radio de es... 1.5
 Velocidad d... 3946.92
 Velocidad d... 9779
 Refrigerante Desactivado
 Longitud de... 40
 Compensaci... 3
 Compensaci... 3
 PlanoC/Pla... Superior
 Combinació... Default (1)

Material en bruto

Detectar automáticamente
 Modelo de mat. en bruto
 Configuración de material en bruto
 Geometría seleccionada del usuario (6)

Criterios de ajustado

Punta de herramienta
 Punto de contacto de herramienta

Tolerancia 0.01

El material en bruto tiene contrasalidas

Ajuste de material en bruto

Reducir
 Expandir 0

Control de colisiones

Proteger hombro de herramienta para evitar colisiones
 Proteger espigo de herramienta para evitar colisiones
 Proteger porta-herramienta para evitar colisiones

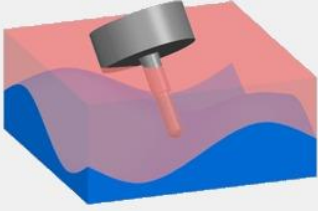
Brechas y cúspide

Ajustar solo contornos completos
 Evitar ajuste en caso de que la brecha sea menor que:

- 5 % de diámetro de herramienta
- 0.5 según valor

Ajustar contornos más cortos que

- 5 % de diámetro de herramienta
- 0.5 según valor



Tipo de trayectoria
 Herramienta
 Porta-herramienta
 Material en bruto
 Patrón de corte
 Definición de pieza
 Control del eje de la herra
 Vinculación
 Aristas
 Miscelaneos
 Configuración adicional

Configuración de vista rápida

Herramienta BALL-NOSE ...
 Diámetro de... 3
 Radio de es... 1.5
 Velocidad d... 3946.92
 Velocidad d... 9779
 Refrigerante Desactivado
 Longitud de... 40
 Compensaci... 3
 Compensaci... 3
 PlanoC/Pla... Superior
 Combinació... Default (1)

Patrón

Mecanizado Desbaste
 Estrategia Desplazamiento de eje central

Orden

Método Zigzag: comenzar desde arista de ataque
 Orden Del centro hacia los bordes, en concordancia

Paso de profundidad

Número máximo 10
 Distancia máxima 1
 Distancia

Ancho de corte

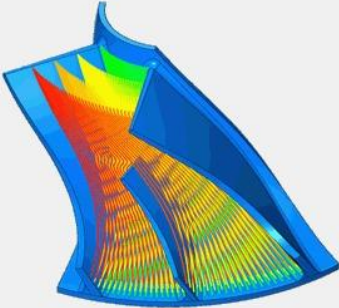
Número máximo 10
 Distancia máxima 1

Primer corte

Tajadas intermedias 0
 % de velocidad de avance del primer corte 33

Material restante

Evitar profundidades incompletas
 Desbastar todas las profundidades



Definición de pieza

Álabes, divisor, redondeos Sobremedida

Eje central Sobremedida

Cubierta Desplazamiento inicial

Superficies protegidas

Eje de rotación

Cantidad de segmentos

Segmentos

Mecanizar

Ángulo inicial

Dirección

Ordenar por

Calidad

Tolerancia de mecanizado

Distancia máxima

Suavizado de línea de flujo de divisor

Suavizado de eje de herramienta

Configuración de vista rápida

Herramienta BALL-NOSE ...

Diámetro de... 3

Radio de es... 1.5

Velocidad d... 3946.92

Velocidad d... 9779

Refrigerante Desactivado

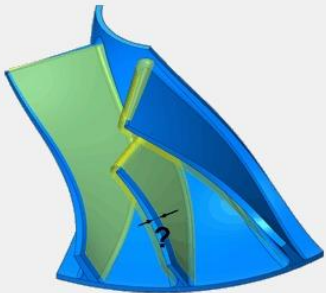
Longitud de... 40

Compensaci... 3

Compensaci... 3

PlanoC/Pla... Superior

Combinació... Default (1)



Definición de pieza

Álabes, divisor, redondeos Sobremedida

Eje central Sobremedida

Cubierta Desplazamiento inicial

Superficies protegidas

Eje de rotación

Cantidad de segmentos

Segmentos

Mecanizar

Ángulo inicial

Dirección

Ordenar por

Calidad

Tolerancia de mecanizado

Distancia máxima

Suavizado de línea de flujo de divisor

Suavizado de eje de herramienta

Configuración de vista rápida

Herramienta BALL-NOSE ...

Diámetro de... 3

Radio de es... 1.5

Velocidad d... 3946.92

Velocidad d... 9779

Refrigerante Desactivado

Longitud de... 40

Compensaci... 3

Compensaci... 3

PlanoC/Pla... Superior

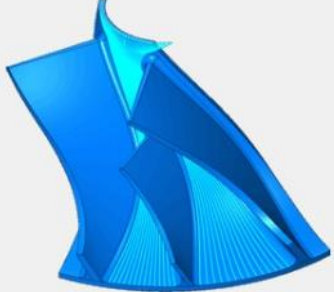
Combinació... Default (1)

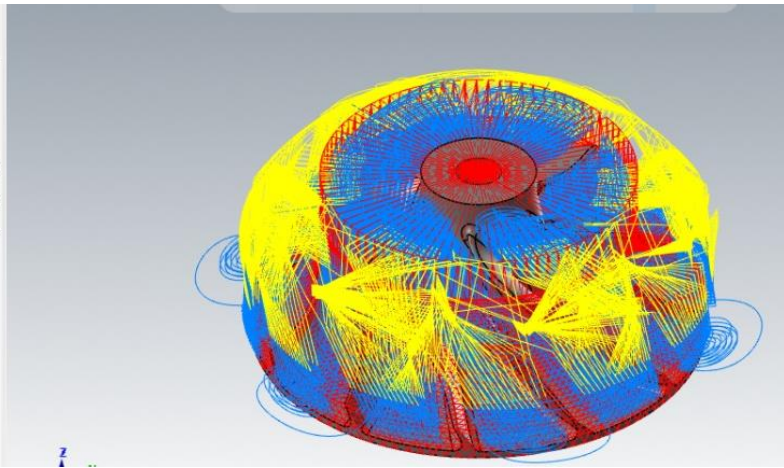
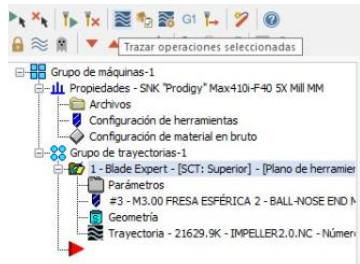
Arista de ataque Arista de salida

Enrollado de arista

Extensión de arista

Tangencial





```
1 |%
2 O2020
3 G21
4 G0 G17 G40 G80 G90 G94 G98
5 G28 G91 Z0.
6 G28 X0. Y0.
7 T1 M6
8 G54 G90 X99.917 Y0. C146.863 B-92.334 S1000 M3
9 G43 Z-4.072 M8
10 Z21.072
11 X23.156 Y9.771
12 Z20.194
13 G1 Z10.194 F250.
14 X22.797 Y9.441 Z10.48 C146.862 B-92.282
15 X22.051 Y8.729 Z11.035 C146.858 B-92.208
16 X21.312 Y7.992 Z11.532 C146.854 B-92.179
17 X20.582 Y7.23 Z11.972 C146.849 B-92.195
18 X19.861 Y6.447 Z12.355 C146.846 B-92.255
19 X19.15 Y5.644 Z12.686 C146.847 B-92.359
20 X18.45 Y4.823 Z12.963 C146.854 B-92.508
21 X17.921 Y3.734 Z13.06 C147.793 B-93.313
22 X17.392 Y2.624 Z13.1 C148.737 B-94.116
23 X16.906 Y1.576 Z13.088 C149.637 B-94.862
24 X16.391 Y.908 Z13.281 C150.105 B-94.543
25 X15.987 Y.29 Z13.401 C150.58 B-94.33
26 X15.609 Y-.445 Z13.462 C151.181 B-94.229
27 X15.198 Y-1.178 Z13.524 C151.807 B-94.002
28 X14.568 Y-1.578 Z13.797 C151.326 B-92.969
29 X14.377 Y-1.704 Z13.874 C151.213 B-92.656
30 X13.902 Y-1.987 Z14.08 C150.934 B-91.787
31 X13.693 Y-2.146 Z14.176 C151.093 B-91.346
32 X13.39 Y-2.378 Z14.304 C151.433 B-90.722
33 X13.131 Y-2.587 Z14.402 C151.874 B-90.203
34 X12.792 Y-2.354 Z14.604 C150.806 B-89.522
35 X12.335 Y-2.342 Z14.825 C150.733 B-88.6
36 X11.868 Y-2.33 Z15.039 C150.637 B-87.664
37 X11.269 Y-2.358 Z15.29 C150.512 B-86.508
38 X10.571 Y-2.399 Z15.589 C150.314 B-85.036
39 X9.651 Y-2.497 Z15.947 C150.068 B-83.14
40 X8.723 Y-2.638 Z16.268 C149.819 B-81.251
41 X8.014 Y-2.77 Z16.494 C149.614 B-79.807
42 X7.278 Y-2.931 Z16.71 C149.376 B-78.288
43 X6.503 Y-3.12 Z16.914 C149.075 B-76.669
44 X5.724 Y-3.315 Z17.099 C148.807 B-75.024
```

ANEXO E: ENLACE SOFTWARE MATCH3 CON MÁQUINA HY 3040

Engine Configuration... Ports & Pins



Port Setup and Axis Selection | Motor Outputs | Input Signals | Output Signals | Encoder/MPG's | Spindle Setup | Mill Options

Signal	Enabled	Step Pin#	Dir Pin#	Dir LowActi...	Step Low A...	Step Port	Dir Port
X Axis		8	9			1	1
Y Axis		16	4			1	1
Z Axis		5	17			1	1
A Axis		7	6			1	1
B Axis		2	3			1	1
C Axis		0	0			0	0
Spindle		0	0			0	0

Aceptar Cancelar Aplicar

Engine Configuration... Ports & Pins



Port Setup and Axis Selection | Motor Outputs | Input Signals | Output Signals | Encoder/MPG's | Spindle Setup | Mill Options

Signal	Enabled	Port #	Pin Number	Active Low
Digit Trig		0	0	
Enable1		0	14	
Enable2		0	14	
Enable3		0	14	
Enable4		0	14	
Enable5		0	14	
Enable6		0	0	
Output #1		0	0	
Output #2		0	0	
Output #3		0	0	

Pins 2 - 9 , 1, 14, 16, and 17 are output pins. No other pin numbers should be used.

Aceptar Cancelar Aplicar

Motor Tuning and Setup



X - AXIS MOTOR MOVEMENT PROFILE

The graph shows a trapezoidal velocity profile for the X-axis. The y-axis is labeled 'Velocity mm's per Minute' and ranges from 0 to 2343.75 with major ticks every 234.375. The x-axis is labeled 'Time in Seconds' and ranges from 0 to 0.5 with major ticks every 0.05. The profile starts at (0,0), rises linearly to a peak velocity of 1406.25 mm/min at 0.1 seconds, remains constant at that velocity until 0.4 seconds, and then falls linearly back to 0 at 0.5 seconds.

Velocity

Axis Selection

- X Axis
- Y Axis
- Z Axis
- A Axis
- B Axis
- C Axis
- Spindle

Accel

Steps per	Velocity In's or mm's per min.	Acceleration in's or mm's/sec/sec	G's	Step Pulse 1 - 5 us	Dir Pulse 0 - 5
320	1500	300	0.0305928	5	5

SAVE AXIS SETTINGS

Cancel OK

Motor Tuning and Setup



Y - AXIS MOTOR MOVEMENT PROFILE

The graph shows a trapezoidal velocity profile for the Y-axis. The y-axis is labeled 'Velocity mm's per Minute' and ranges from 0 to 2343.75 with major ticks every 234.375. The x-axis is labeled 'Time in Seconds' and ranges from 0 to 0.5 with major ticks every 0.05. The profile starts at (0,0), rises linearly to a peak velocity of 1406.25 mm/min at 0.1 seconds, remains constant at that velocity until 0.4 seconds, and then falls linearly back to 0 at 0.5 seconds.

Velocity

Axis Selection

- X Axis
- Y Axis
- Z Axis
- A Axis
- B Axis
- C Axis
- Spindle

Accel

Steps per	Velocity In's or mm's per min.	Acceleration in's or mm's/sec/sec	G's	Step Pulse 1 - 5 us	Dir Pulse 0 - 5
320	1500	300	0.0305928	5	5

SAVE AXIS SETTINGS

Cancel OK

Motor Tuning and Setup



Z - AXIS MOTOR MOVEMENT PROFILE

Velocity

Axis Selection

X Axis

Y Axis

Z Axis

A Axis

B Axis

C Axis

Spindle

SAVE AXIS SETTINGS

Cancel OK

Accel

Steps per	Velocity In's or mm's per min.	Acceleration in's or mm's/sec/sec	G's	Step Pulse 1 - 5 us	Dir Pulse 0 - 5
320	799.8	300	0.0305928	5	5

Motor Tuning and Setup



A - AXIS MOTOR MOVEMENT PROFILE

Velocity

Axis Selection

X Axis

Y Axis

Z Axis

A Axis

B Axis

C Axis

Spindle

SAVE AXIS SETTINGS

Cancel OK

Accel

Steps per	Velocity In's or mm's per min.	Acceleration in's or mm's/sec/sec	G's	Step Pulse 1 - 5 us	Dir Pulse 0 - 5
26.666	1000.2	300	0.0305928	5	5

Motor Tuning and Setup



B - AXIS MOTOR MOVEMENT PROFILE

Axis Selection

X Axis
Y Axis
Z Axis
A Axis
B Axis
C Axis
Spindle

Velocity

Accel

Steps per	Velocity In's or mm's per min.	Acceleration in's or mm's/sec/sec	G's	Step Pulse 1 - 5 us	Dir Pulse 0 - 5
26.666	1000.2	300	0.0305928	5	5

SAVE AXIS SETTINGS
Cancel OK

Engine Configuration... Ports & Pins



Port Setup and Axis Selection | Motor Outputs | **Input Signals** | Output Signals | Encoder/MPG's | Spindle Setup | Mill Options

Signal	Enabled	Port #	Pin Number	Active Low	Emulated	HotKey
Input #3	<input checked="" type="checkbox"/>	0	0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	0
Input #4	<input checked="" type="checkbox"/>	0	0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	0
Probe	<input checked="" type="checkbox"/>	0	0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	0
Index	<input checked="" type="checkbox"/>	0	0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	0
Limit Ovrd	<input checked="" type="checkbox"/>	0	0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	0
EStop	<input checked="" type="checkbox"/>	1	0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	0
THC On	<input checked="" type="checkbox"/>	0	0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	0
THC Up	<input checked="" type="checkbox"/>	0	0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	0
THC Down	<input checked="" type="checkbox"/>	0	0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	0

Pins 10-13 and 15 are inputs. Only these 5 pin numbers may be used on this screen

Aceptar Cancelar Aplicar

System HotKeys Setup



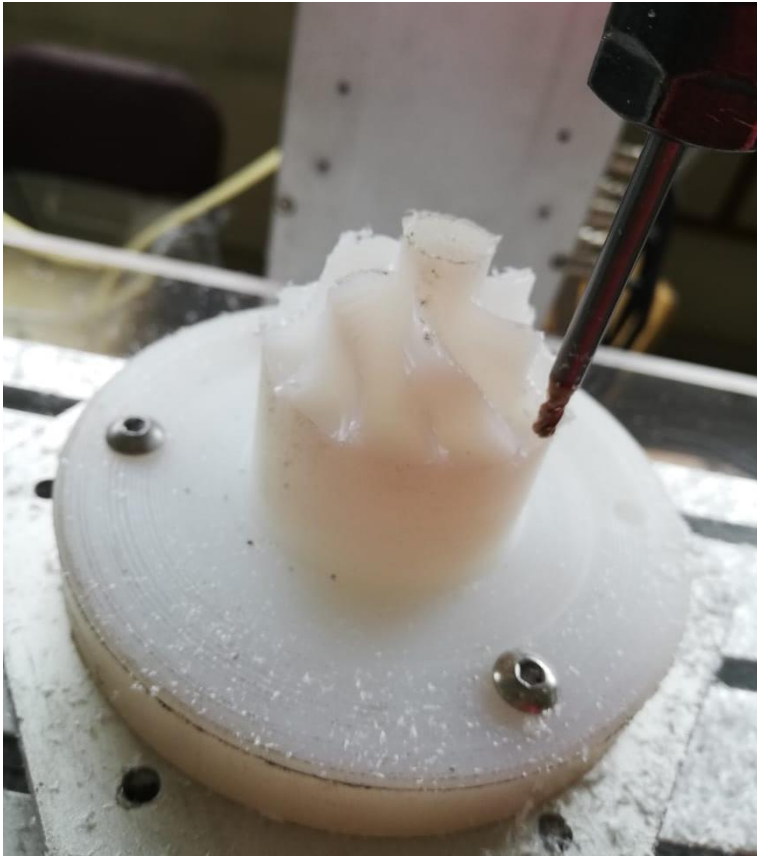
Jog Hotkeys			
	ScanCode		ScanCode
X++	39	X--	37
Y++	38	Y--	40
Z++	33	Z--	34
A/U++	13	A/U--	13
B/V++	13	B/V--	13
C/W++	999	C/W--	999

External Buttons - OEM Codes			
Trigger #	OEM Code		OEM Code
1	-1	8	-1
2	-1	9	-1
3	-1	10	-1
4	-1	11	-1
5	-1	12	-1
6	-1	13	-1
7	-1	14	-1
		15	-1

System Hotkeys			
	ScanCode		ScanCode
DRO Select	999	Code List	999
MDI Select	999		
Load G-Code	999		

**ANEXO F: MECANIZADO DEL IMPELLER EN 3 EJES MEDIANTE LA MÁQUINA
HY 3040**







**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE
CHIMBORAZO
DIRECCIÓN DE BIBLIOTECAS Y RECURSOS
PARA EL APRENDIZAJE Y LA INVESTIGACIÓN**



UNIDAD DE PROCESOS TÉCNICOS

REVISIÓN DE NORMAS TÉCNICAS, RESUMEN Y BIBLIOGRAFÍA

FECHA DE ENTREGA: 12 / 04 / 2021

INFORMACIÓN DEL AUTOR/A (S)

NOMBRES – APELLIDOS: CRISTIAN GEOVANNY ACOSTA ROMERO
DARÍO MARCELO CARRILLO DOMÍNGUEZ

INFORMACIÓN INSTITUCIONAL

FACULTAD: MECÁNICA

CARRERA: INGENIERÍA MECÁNICA

TÍTULO A OPTAR: INGENIERO MECÁNICO

F. ANALISTA DE BIBLIOTECA RESPONSABLE:

ING. CPA. JHONATAN RODRIGO PARREÑO UQUILLAS. MBA.



12-04-2021

0905-DBRAI-UTP-2021