

**DESARROLLO DEL PROCESO DE MANUFACTURA DE UN IMPELLER EN UN
CENTRO DE MECANIZADO MULTIEJE EMPLEANDO EL SOFTWARE NX CAM**

**Camilo André Castillo Téllez
Adolfo Enrique Osorio Vargas**

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
DIVISIÓN DE INGENIERÍAS
BOGOTÁ D.C.
2016**

**DESARROLLO DEL PROCESO DE MANUFACTURA DE UN IMPELLER EN UN
CENTRO DE MECANIZADO MULTIEJE EMPLEANDO EL SOFTWARE NX CAM**

**Camilo André Castillo Téllez
Adolfo Enrique Osorio Vargas**

**Proyecto de Trabajo de Grado en la modalidad de solución a un problema de
ingeniería para optar al título de Ingeniero Mecánico**

**Director
Jorge Andrés García Barbosa**

**Codirector
Carlos Julio Camacho López**

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
DIVISIÓN DE INGENIERÍAS
BOGOTÁ D.C.
2016**

AGRADECIMIENTOS

Deseamos expresar nuestros agradecimientos a todas aquellas personas que de alguna manera hicieron posible la culminación de este proyecto de grado. al ingeniero Jorge Andrés García Barbosa, al ingeniero Carlos Julio Camacho por sus correcciones y sugerencias para el desarrollo de cada uno de los capítulos, al ingeniero Yamid Gonzalo Reyes Egresado de la universidad Santo Tomas por su proyecto de grado que fue una base indispensable para el desarrollo de este trabajo, a la faculta de ingeniería Mecánica de la Universidad Santo Tomás por permitir la realización de este proyecto dentro de sus instalaciones, permitiéndonos hacer uso de la tecnología requerida para poder desarrollar cada uno de los capítulos.

A nuestros padres por ser los orientadores a lo largo de la carrera, que siempre brindaron su valioso consejo y apoyo. De igual forma a nuestros compañeros y amigos por el apoyo y la ayuda a largo de nuestra estancia en la universidad.

TABLA DE CONTENIDO

1. RESUMEN	12
2. INTRODUCCIÓN	13
3. OBJETIVOS	15
3.1 GENERAL.....	15
3.2 ESPECÍFICOS.....	15
4. ANTECEDENTES (ESTADO DEL ARTE).....	16
4.1 Diseño de compresores	16
4.1.1 Número específico de revoluciones de los TC radiales y axiales.....	18
4.1.2 Relación de compresión en un TC centrífugo	25
4.1.3 Relación de compresión máxima en TC de varios escalonamientos: 26	
4.1.4 Selección del ángulo de salida de los álabes β_2 en un rodete radial de baja presión.....	30
4.1.5 Factor de disminución de trabajo de los TC centrífugos	34
4.1.6 Cálculo de las dimensiones principales.....	40
4.1.7 Triángulos de velocidad en el rodete.....	44
4.1.8 Anchos a la entrada y salida b_1 y b_2	45
4.1.9 Diámetro del eje d_e , diámetro del cubo d_c y diámetro de la boca del rodete d_a	46
4.1.10 Número y trazado de los álabes	46
4.2 Diseño CAD paramétrico	49
4.2.1 Parametrización en SIEMENS NX	50
4.3 Operaciones de mecanizado multieje	57
4.3.1 Operaciones multieje en los software CAD/CAM	61
4.3.2 CAM	74
5. GEOMETRÍA DEL IMPELLER	76
5.1 Características geométricas del <i>impeller</i>	76
5.1.1 Triángulos de velocidad	80
5.1.2 Trabajo interno	82
5.1.3 Rendimiento volumétrico.....	87
5.1.4 Cálculos finales	89
5.2 Diseño CAD paramétrico del <i>impeller</i>	91
6. PLAN DE MANUFACTURA.....	103

6.1	Selección del material.....	103
6.2	Análisis de montaje en el centro de mecanizado.....	107
6.3	Desarrollo de las estrategias de manufactura del “PRE-MAQUINADO” del <i>impeller</i>	113
6.4	Desarrollo de las estrategias de manufactura par el tallado de los álabes del <i>impeller</i>	120
7.	FABRICACIÓN DEL IMPELLER	140
7.1	Manufactura ajuste material en bruto	140
7.2	Pre-maquinada fabricación del impeller.....	141
7.3	Proceso de manufactura fabricación del impeller	143
7.4	Análisis de error en el mecanizado	146
8.	CONCLUSIONES	149
9.	RECOMENDACIONES	150
10.	BIBLIOGRAFÍA	151
	Anexos.....	152
	Hoja de proceso ajustes material en bruto	152
	Hoja de proceso <i>Impeller</i>	156
	Planos.....	160
	Plano 3 impeller.....	160
	Plano 2 pre-maquinado	160
	Plano 1 material en bruto ajustes de maquinado	160
	Flujogramas.....	160
	Flujograma diseño paramétrico	160
	Flujograma proceso de manufactura.....	160

LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Corte de un turbo compresor según su clasificación	16
Ilustración 2. Grafica comparativa de eficiencia vs carga parcial para TC radial y axial	17
Ilustración 3. Curvas características de un TC (a) radial (b) axial.....	18
Ilustración 4. Grafica de Eckert, correspondiente a los coeficientes de presión ψ , caudal φ y número específico de revoluciones para cada TC.	19
Ilustración 5. Vistas de un TC centrífugo, (a) corte transversal (b) corte meridional (c) triangulo de velocidades	20
Ilustración 6. Presión estática y dinámica a la entrada del TC centrífugo.	21
Ilustración 7. Rodete de entrada axial y salida radial	21
Ilustración 8. Corona directriz de un TC centrífugo para una caldera	22
Ilustración 9. Diferentes tipos de rodetes en un TC centrífugo.	22
Ilustración 10. Diferentes disposiciones de álabes según el ángulo de salida	23
Ilustración 11. TC centrífugo con álabes del rodete curvados a la entrada y salida radial ($\alpha_1 = 90^\circ$ $\beta_2 = 90^\circ$)	23
Ilustración 12. Rodete TC con alabes de salida radial, curvados a la entrada del tipo semiabierto	24
Ilustración 13. Rodetes que desplazan volúmenes diferentes y generan igual presión a la salida p_3	26
Ilustración 14. TC centrífugo de varios escalonamientos en corte meridional y corte radial.	26
Ilustración 15. TC rodete carcasa	27
Ilustración 16. Valores máximo y mínimo del ángulo β_2	32
Ilustración 17. Rodete siroco.	33
Ilustración 18. Torbellino potencial en el rodete de un TC centrífugo.	34
Ilustración 19. Triangulo de salida de un TC centrífugo con número infinito y finito de álabes.	35
Ilustración 20. Abaco para calcular el coeficiente e_z	36
Ilustración 21. Coeficiente numérico de trasformada de las distintas formas del número específico de revoluciones.....	40
Ilustración 22.....	40
Ilustración 23. Dimensiones principales de un rodete de TC radial (a) corte meridional (b) corte transversal.....	41
Ilustración 24. Diagrama de Eckert para la estimación de las dimensiones principales de un TC radial.	42
Ilustración 25. TC centrífugo de un turborreactor con corona directriz a la entrada.	44
Ilustración 26. Numero de alabes Z de un TC radial en función del Angulo medio de álabes	47
Ilustración 27. Trazado del álabe de un TC radial constituido por, (a) por un arco de circulo (b) por una recta.	48
Ilustración 28. Diseño paramétrico.....	49

Ilustración 29 Uso de <i>expressions</i>	51
Ilustración 30 eliminar con una expression booleana	51
Ilustración 31 gestor para creación de condicionales	52
Ilustración 32 interface creada en el PTS	53
Ilustración 33 herramientas de la interface	54
Ilustración 34 diseño de la interface.....	54
Ilustración 35 rangos estilo Scale	55
Ilustración 36 Dependencia de un grupo visible.....	56
Ilustración 37. Diferentes tipos de piezas con geometrías complejas que requieren diferentes tipos de mecanizado.	57
Ilustración 38. Partes de un centro de mecanizado de 5 ejes.....	59
<i>Ilustración 39. Sistema coordenado diestro en un CNC</i>	59
Ilustración 40. Sistema coordenado en un CNC de 5 ejes de movimiento	60
Ilustración 41. Indexación de 4 eje en una maquina CNC	60
Ilustración 42. Maquinado en 4 ejes haciendo uso de la indexación.	61
Ilustración 43. Diferentes tipos de operaciones en NX	62
Ilustración 44. Cambio del eje de la herramienta en operaciones multieje	63
Ilustración 45. Eje de la herramienta según la trayectoria de esta.....	63
Ilustración 46. Interfaz de la operación “variable contour”	64
Ilustración 47. Diferentes métodos de proyección de vector.....	65
Ilustración 48. Método de proyección de vector.....	65
Ilustración 49 método de proyección variable	66
Ilustración 50. representación gráfica de los ángulos tilt y lead	67
Ilustración 51. Trayectoria de la operación rotation angle.....	67
Ilustración 52. Movimiento de la herramienta con la opción normal tool axis”	68
Ilustración 53. Forma de trabajo de los ángulos lead o tilt	68
Ilustración 54. Movimiento de la herramienta con la opción de punto coordinar	69
Ilustración 55. Movimiento de la herramienta siguiendo una trayectoria de línea focal	69
Ilustración 56. Angulo lead de la herramienta adaptado para coincidir con los requisitos de la geometría.....	70
Ilustración 57. Diferentes opciones para la opción “interpolate Vector”	71
Ilustración 58. Movimiento de la herramienta con la opción “interpolate Vector” ...	72
Ilustración 59. Diferentes formas de mecanizado de la opción “Rotary Floor”	73
Ilustración 60. Operaciones específicas de la opción Multi Blade.....	73
Ilustración 61. Tipos de simulación de proceso	74
Ilustración 62. Diagrama de flujo para fabricación de por simulador.....	75
Ilustración 63. Diagrama de Eckert donde se ilustra la selección de los datos.	78
Ilustración 64. Selección del número de alabes.....	79
<i>Ilustración 65. Diagrama triángulo de velocidad a la entrada</i> 80	
Ilustración 66. Selección de ez.....	81
<i>Ilustración 67. Diagrama triangulo de velocidad a la salida</i>	82
Ilustración 68. Caudal intersticial g_e reducido en función de la relación de compresión.	87

Ilustración 69. Diagrama donde se representa las dimensiones principales del rodete que se hallaron	91
Ilustración 70. Vista superior y frontal del impeller	92
Ilustración 71 variables de entrada (1). ángulo de entrada axial, (2) ángulo inclinación del impeller, (3) altura del alabe b1, (4) altura del alabe b2, (5) altura del avellanado y altura base, (6) agujero para el eje.	93
Ilustración 72 Secuencias diseño CAD (1) Revolución, (2) proyección curva de los alabes. (3) extrusión del alabe, (4) impeller terminado	94
Ilustración 73 Features (1) organización en grupos, (2) operaciones.	95
Ilustración 74 designación de valores	96
Ilustración 75 Eliminación de una operación por una Expresión.....	97
Ilustración 76 Interface dimensiones generales	98
Ilustración 77 Organización del PTS	99
Ilustración 78 Product template Studio (1) dimensiones frontales d2,d1 y alturas. (2) dimensiones superiores d1, ángulos de entrada y salida. (3) pestaña alabes selección de alabes internos, selección número de alabes y el ángulo de entrada axial. (4) selección de la inclinación de alabe, redondeos y espesor del álabe ...	100
<i>Ilustración 79 Product Template Studio (1) dimensiones del alabe b1 y b2. (2) operaciones superiores altura Ac, altura del avellanado. (3) diseño Impeller interface</i>	101
Ilustración 80 Impeller paramétrico	102
Ilustración 81. Distintos tipos de gases presentes en el funcionamiento de un impeller dentro de una turbomáquina.	103
Ilustración 82. Propiedades mecánicas del acero AISI-SAE 4140.....	106
<i>Ilustración 83. Diámetros comerciales disponibles del aluminio AA 7075-T6</i>	107
Ilustración 84. Limitaciones en diferentes clases de mecanizado para distintas piezas de mecanizado complejo	109
Ilustración 85. Tipo de montaje propuesto para la mecanización del impeller	110
Ilustración 86. Montaje y ensamble para el mecanizado de ajuste	110
Ilustración 87. Diseño, simulación y fabricación del planeado para ajuste del material	111
Ilustración 88. Diseño, simulación y fabricación del cajeado	111
Ilustración 89. Diseño, simulación y fabricación del avellanado para el ajuste del material	112
Ilustración 90. Ensamble del material pre maquinado.	113
Ilustración 91. Diseño y simulación del planeado pre-maquinado	114
Ilustración 92. Diseño y simulación del cilindro	115
Ilustración 93. Algunas condiciones de corte de la herramienta KYOCERA MRF 16-S20	115
Ilustración 94. Diseño y simulación de la superficie cilíndrica del pre maquinado	116
Ilustración 95. Diseño y simulación del acabado superficie cilíndrica del pre maquinado	116
Ilustración 96. Cuadro de dialogo de la operación "ROTARY_FLOOR"	117
Ilustración 97. Cuadro de dialogo "Rotary Floor Finish Drive Method"	118

Ilustración 98. Análisis virtual de NX en la superficie de la geometría de “PRE_MAQUINADO”	119
Ilustración 99. Partes del impeller reconocidas por NX.....	120
Ilustración 100. Simulación de la operación “MULTI_BLADE_ROUGH” con un impeller con álabes intermedios.....	121
Ilustración 101. Selección del “Specify Cut Area” de la geometría del impeller ...	122
Ilustración 102. Selección de geometría de trayectoria del impeller	122
Ilustración 103. Selección de variables en la operación en el cuadro de dialogo “Surface Area”	123
Ilustración 104. Cuadro de dialogo de la opción “Relative to Vector”	123
Ilustración 105. Resultado de la estrategia de la operación “VARIABLE_CONTOUR”	124
Ilustración 106. Planos proyectados para ser usados de base en la manufactura del impeller	125
Ilustración 107. Selección de “Workpiece” para la primera operación de desbaste	125
Ilustración 108. (1) Área de corte (2) ángulos “Lead and Tilt” (3) resultado de la trayectoria	126
Ilustración 109. (1) Área de corte (2) ángulos “Lead and Tilt” (3) resultado de la trayectoria	127
Ilustración 110. (1) Área de corte (2) ángulos “Lead and Tilt” (3) resultado de la trayectoria	128
Ilustración 111. (1) Área de corte (2) ángulos “Lead and Tilt” (3) resultado de la trayectoria	129
Ilustración 112. (1) Área de corte (2) ángulos “Lead and Tilt” (3) resultado de la trayectoria	129
Ilustración 113. Resultados del desbaste por medio de la simulación avanzada simulación avanzada IS&V	130
Ilustración 114. Dimensiones de la herramienta HGT BLM0306	131
Ilustración 115. (1) Área de corte (2) ángulos “Lead and Tilt” (3) resultado de la trayectoria	132
Ilustración 116. (1) Área de corte (2) ángulos “Lead and Tilt” (3) resultado de la trayectoria	132
Ilustración 117. (1) Área de corte (2) ángulos “Lead and Tilt” (3) resultado de la trayectoria	133
Ilustración 118. (1) Área de corte (2) ángulos “Lead and Tilt” (3) resultado de la trayectoria	134
Ilustración 119. (1) Área de corte (2) ángulos “Lead and Tilt” (3) resultado de la trayectoria (4) Simulación de la operación de acabado del álabe izquierdo parte superior	134
Ilustración 120. (1) Área de corte (2) ángulos “Lead and Tilt” (3) resultado de la trayectoria (4) Simulación de la primera operación de acabado del fondo izquierdo	136

Ilustración 121. (1) Área de corte (2) ángulos “Lead and Tilt” (3) resultado de la trayectoria (4) Simulación de la segunda operación de acabado del fondo izquierdo	136
Ilustración 122. (1) Área de corte (2) ángulos “Lead and Tilt” (3) resultado de la trayectoria (4) Simulación de la tercera operación de acabado del fondo izquierdo	137
Ilustración 123. (1) Área de corte (2) ángulos “Lead and Tilt” (3) resultado de la trayectoria (4) Simulación de la cuarta operación de acabado del fondo izquierdo	137
Ilustración 124. (1) Área de corte (2) ángulos “Lead and Tilt” (3) resultado de la trayectoria (4) Simulación de la quinta operación de acabado del fondo izquierdo	138
Ilustración 125. (1) Área de corte (2) ángulos “Lead and Tilt” (3) resultado de la trayectoria (4) Simulación de la quinta operación de acabado del fondo izquierdo	139
Ilustración 126 ajuste material en bruto 1) simulación 2) cajoneado 3) avellanado	140
Ilustración 127 montaje material en bruto	141
Ilustración 128 mecanizado pre maquinado impeller	142
Ilustración 129 fabricación de los alabes	143
Ilustración 130 Mecanizado de los alabes	144
Ilustración 131 Impeller terminado	145
Ilustración 132 Error en el ensamble	146
Ilustración 133 marcas de mecanizado.....	146
Ilustración 134 simulación error alabes.....	148

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Relación de compresión por escalonamiento	17
Tabla 2. Comparación de diferentes parámetros con diferentes β_2	32
Tabla 3. Relación de β_2 y el coeficiente ψ	43
Tabla 4. Condiciones de entra al rodete	76
Tabla 5. Características del aire en las cartas psicométricas	77
Tabla 6. Relación de compresión en TC centrífugo	77
Tabla 7. dimensiones geométricas principales del impeller	79
Tabla 8. Valores triángulo de velocidad a la entrada	80
Tabla 9. Valores triangulo de velocidad a la salida	82
Tabla 10. Propiedades del aire	83
Tabla 11. Propiedades del aire a la entada	84
Tabla 12. Perdidas internas en el TC centrífugo.	84
Tabla 13. Estado termodinámicos totales a la entrada	85
Tabla 14. Estados estáticos en la entrada del rodete.	85
Tabla 15. Estados termodinámicos a la salida del rodete.	86
Tabla 16. Estado estático a la salida del rodete.	87
Tabla 17. Dimensiones finales del rodete	90
Tabla 18 Rangos de diámetros	95
Tabla 19. Composición química y normas del acero AISI-SAE 4140	105
Tabla 20. Composición química del aluminio AA 7075	107
Tabla 21. Propiedades mecánicas del aluminio AA 7075	107
Tabla 22. Parámetros de corte del mecanizado ajuste	112
Tabla 23. Parámetros de corte del mecanizado del PRE-MAQUINADO	119

1. RESUMEN

En este trabajo de grado se implementó el proceso de manufactura para usar la máxima capacidad tecnológica disponible en el centro de mecanizado con el que cuenta la universidad, en el cual se manufacturo un *Impeller*¹ por sus características geométricas complejas como lo son álabes curvados, álabes intermedios y ángulos de inclinación, este proceso se logró mediante el empleo del centro de mecanizado usando la tecnología 4+1 ejes vertical.

El proceso comienza con el diseño termodinámico del *impeller* en donde se hallaron las dimensiones de este de acuerdo a los requerimientos de ingeniería, luego de este proceso se realiza el diseño CAD donde se programa el modelo virtual, en el cual se parametriza con las ecuaciones y restricciones geométricas que gobiernan la geometría del *impeller*. Con el CAD paramétrico se pueden obtener diferentes piezas con variaciones en su geometría el cual facilita la selección del diseño más adecuado para la manufactura.

Después del diseño CAD se planifico el proceso de manufactura seleccionando el material y las herramientas para cada una de las operaciones de corte usando el software Nx CAM, en el proceso de manufactura se usaron diferentes herramientas del software para realizar la programación, simulación y verificación las cuales permitieron hacer uso de tecnologías multi-eje 4+1, para realizar la verificación de las trayectorias de la herramienta y verificación de colisiones, se usó la máquina virtual desarrollada en el trabajo de grado del ingeniero Yamid Reyes.

Con todas las verificaciones y simulaciones se realizó el último paso en el cual se fabricó el *impeller*, demostrando el uso de la tecnología 4+1 ejes para la fabricación de piezas complejas en el centro de mecanizado.

¹ Es un elemento de una maquina hidráulica que realiza la impulsión de un fluido (rodete) en este caso se refiere al impulsor de un compresor centrifugo.

2. INTRODUCCIÓN

En Colombia se cuenta con la tecnología de máquinas herramientas multi-eje para la fabricación de diferentes piezas a nivel industrial y académico, en la actualidad se encuentran varios problemas que limitan el aprovechamiento de la capacidad total de las máquinas herramientas con esta tecnología, entre estos problemas se encuentran: (1) El empleo de software de alta gama para hacer simulaciones de la fabricación ya que son de elevado costo, (2) No hay suficiente personal calificado para la implementación de operaciones tecnológicas multi-eje. Al implementar el software aumenta los costos de fabricación al tener que contratar la persona calificada para su manipulación. Para la industria colombiana es una necesidad emplear la manufactura multi-eje, por el aumento de la demanda de componentes mecánicos que debido a su geometría no se pueden fabricar con las tecnologías existentes. Con un centro de mecanizado multi-eje y un software adecuado se pueden obtener piezas con formas complejas, con gran cantidad de aplicaciones en la industria como por ejemplo componentes mecánicos para repuestos de máquinas, biomecánica, moldes de inyección, industria aeronáutica, industria hidroeléctrica, etc.

En la universidad se han realizado proyectos acerca de manufactura avanzada uno de estos proyectos es la realización de Simulación avanzada IS&V(simulación y verificación integrada) del centro de mecanizado, en este se realizó el postprocesador y la máquina virtual, este trabajo de grado facilita la programación de los procesos de manufactura además que tiene la capacidad de realizar la simulación del proceso, donde se puede ver la trayectorias y movimientos de la maquina; con esto se puede eliminar los tiempos muertos y hacer más eficiente el proceso CAD/CAM. Otro de los trabajos de manufactura avanzada es la fabricación de los componentes del robot Delta diseñando en la faculta de Ingeniería mecánica, en este trabajo se realizado el proceso CAD/CAM haciendo uso de la máquina virtual, con el proceso de simulación avanzada IS&V el cual permitió realizar piezas que requerían una fabricación en 3+2 ejes, con esta herramienta se pudo ver la rotación de los diferentes ejes, la proximidad de la herramienta con la copa de sujeción así como los distinto procesos de mecanizado.

El principal objetivo de este trabajo de grado es realizar la fabricación del impeller haciendo uso de las herramientas disponibles y recursos con los que contamos tanto físicos y tecnológicos, siguiendo los siguientes pasos: lo primero es realizar el análisis termodinámico del *impeller* (compresor centrifugo) para obtener la geometría y hacer un modelo CAD paramétrico basado en las ecuaciones y características del mismo, lo segundo realizar un plan de manufactura definiendo el

sistema de sujeción, herramientas y material, lo tercero es realizar la programación de operaciones de corte y simular sus trayectorias en la máquina virtual haciendo uso de la simulación avanzada IS&V la cual va permitir la verificación de las operaciones multi-ejes para la manufactura de la pieza y por ultimo realizar la fabricación de este componente en 4+1 ejes.

En la actualidad este tipo de manufactura no es muy difundida en el país debido a algunas limitaciones tanto económicas como sociales, este proyecto pretende demostrar la viabilidad y efectividad de emplear la tecnología multi-eje y simulación CAD/CAM. Se espera a corto plazo el fortalecimiento de la manufactura multi-eje en la Universidad Santo Tomás reforzando las materias como procesos de manufactura II y CAD/CAM incorporando nuevos temas de estudio y transferencia de conocimientos adquiridos con el proyecto.

3. OBJETIVOS

3.1 GENERAL

Implementar el proceso de manufactura para la fabricación de un *impeller* utilizando la aplicación de NX CAM.

3.2 ESPECÍFICOS

- Obtener la geometría de un *impeller* haciendo usos de herramientas CAD.
- Realizar el plan de manufactura para el *impeller*
- Generar y simular las trayectorias de manufactura
- Realizar la fabricación del *impeller*

4. ANTECEDENTES (ESTADO DEL ARTE)

4.1 Diseño de compresores

Para algunos procesos industriales en especial aquellos que requieren la compresión de gases y en especial de aire y cuando los caudales de estos gases son elevados y las presiones no son elevadas se usan los turbo compresores por que brinda unas ventajas sobre otro tipo de compresores como puede ser[1]:

- Construcción compacta
- Montaje sencillo
- Volumen de maquina reducido
- Carece de vibraciones
- No requiere mucha corriente eléctrica en el arranque
- No presenta problemas de mezcla de aceite de lubricación

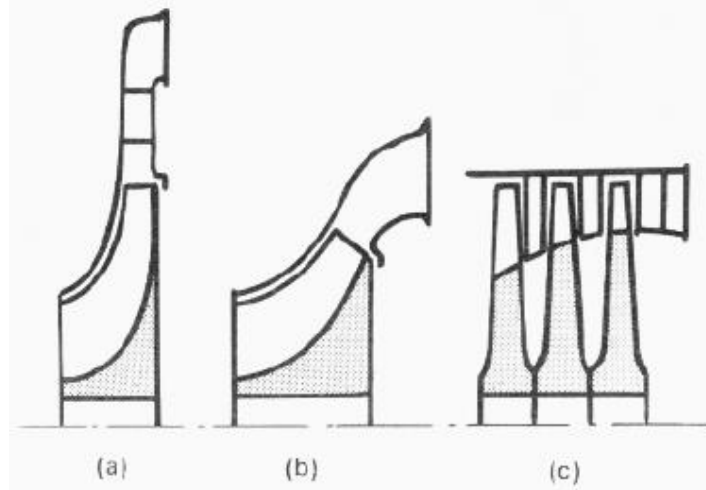
Así mismo existe diferentes tipos de turbo compresores que se clasifican según la dirección del flujo:

Radiales²

Diagonales (semiaxiales, radio-axiales o flujo mixto)

Axiales

Ilustración 1. Corte de un turbo compresor según su clasificación



Fuente: turbomáquinas Claudio Mataix [1]

Los turbo compresores centrífugos tienen las siguientes ventajas con respecto a los otros tipos:

- Son elementos robustos, ofrecen mayor seguridad
- Menor número de escalonamientos
- Mayor facilidad de alojamiento de los interrefrijadores

² Tanto el (a) y el (b) se denominan compresores centrífugos

- Mayor estabilidad de funcionamiento

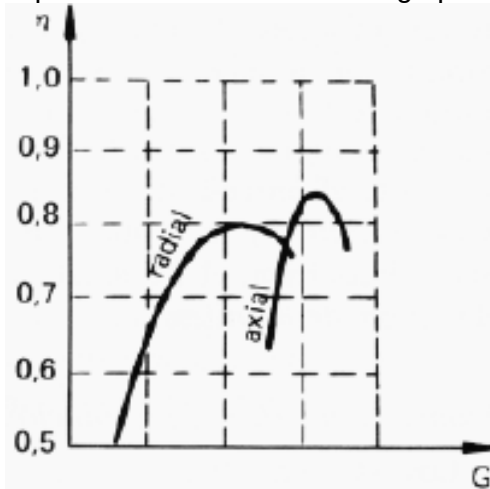
Una diferencia muy grade entre las diferentes clases de TC³ es la de relaciones de compresión; es decir que un TC axial tiene la característica de producir relaciones de compresión más elevadas y gran potencia por esta razón los motores a reacción suelen incorporarlo. Por otro lado, Los TC radiales no pueden alcanzar relaciones muy altas, con lo cual el peso y volumen de la maquina será menor a diferencia de un TC axial.

Tabla 1. Relación de compresión por escalonamiento

Escalonamiento TC radial	Máxima realizable: 3 a 5 Valores normales: 1,5 a 2,5
Escalonamiento TC axial	Máxima realizable: 1,5 a 2 Valores normales: 1,05 a 1,2

Fuente: turbomáquinas Claudio Mataix

Ilustración 2. Grafica comparativa de eficiencia vs carga parcial para TC radial y axial

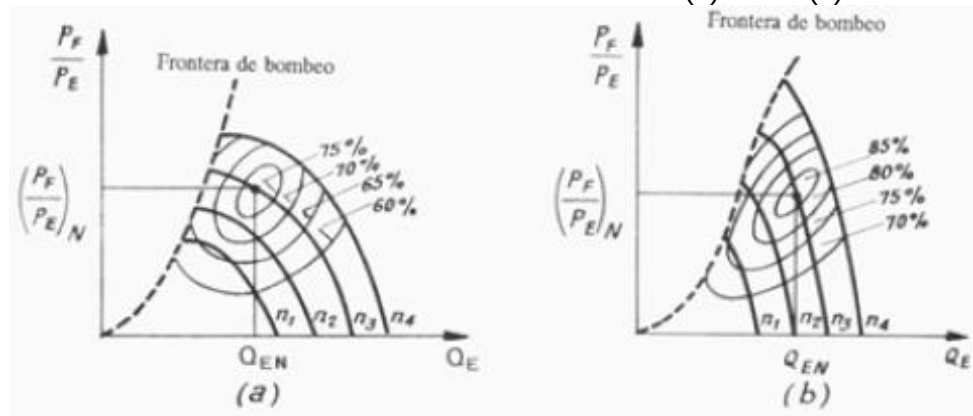


Fuente: turbomáquinas Claudio Mataix

Como se muestra en la ilustración 2. El TC axial tienen mayor rendimiento que el radial, pero cuanto aumenta la carga parcial o caudal esta disminuye su eficiencia de forma rápida, por el contrario el TC radial presenta un funcionamiento más plano de acuerdo que a medida que aumenta la carga aumenta su eficiencia[1]. En la ilustración 3 se muestra las curvas características de acuerdo a uno parámetros que son la relación de presiones (P_f/P_e), caudal de entrada Q_e y las revoluciones por minuto n , como se ve en la ilustración la intercepción de puntos entre la relación de presiones nominal y el Caudal de entrada se establece el punto nominal o de diseño que es el punto donde el rendimiento es máximo, se puede ver que es más elevado en el TC axial.

³ TC: turbo compresor

Ilustración 3. Curvas características de un TC (a) radial (b) axial



Fuente: turbomáquinas Claudio Mataix

El TC radial tiene una zona de funcionamiento estable mayor como se muestra en la anterior ilustración. A cada número de revoluciones e caudal solo puede disminuir, y respectivamente la relación de compresión aumenta, hasta un cierto valor límite. El lugar geométrico de los puntos de funcionamiento límites es la curva límite de bombeo trazada con puntos en la ilustración 3. Al disminuir el caudal por debajo de este valor la difusión inherente al proceso de compresión es excesiva, se origina el desprendimiento de *la capa límite*⁴ y tiene lugar un flujo de retroceso, acompañado de vibraciones y ruido. El Tc axial es más sensible a este fenómeno llamado *bombeo* debido a que su área en la curva es más reducida[1].

4.1.1 Número específico de revoluciones de los TC radiales y axiales

El coeficiente de presión y el del caudal caracterizan a una Turbo máquina, por consecuencia estos coeficientes pueden tener un valor idéntico en todas las turbo maquinas geoméricamente semejantes, estas determinan la geometría optima de la máquina para conseguir con rendimiento óptimo las características de servicio tales como el incremento de presión a un determinado caudal. Sin embargo, se caracteriza la forma del rodete con un coeficiente denominado número específico de revoluciones[1].

$$\sigma = \varphi^{\frac{1}{2}} * \psi^{-\frac{3}{4}}$$

Donde:

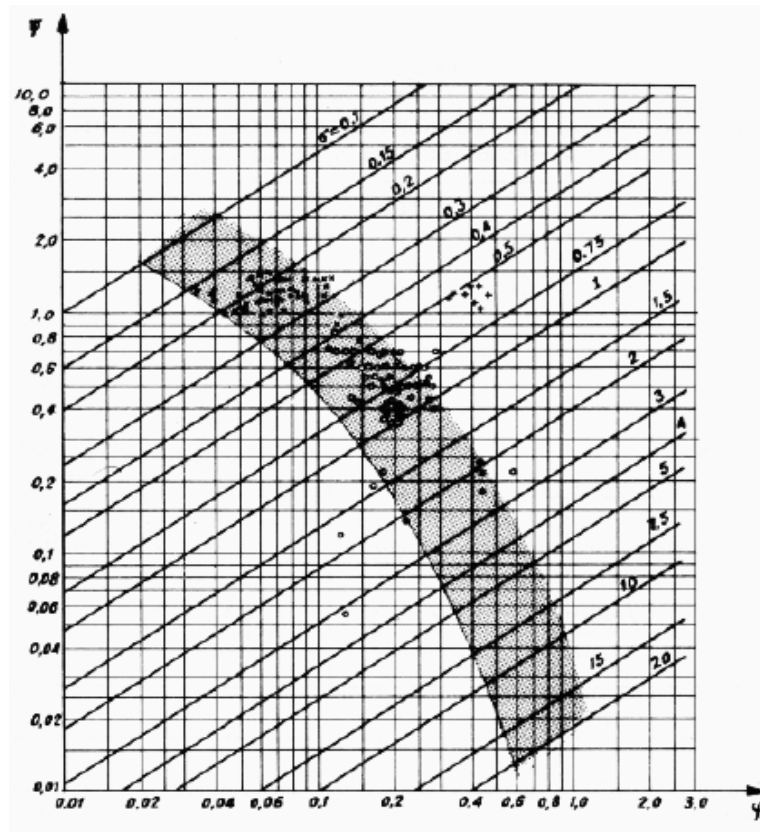
- φ Es el coeficiente de caudal
- ψ es el coeficiente de presión

⁴ Es propio de la naturaleza de la viscosidad y el flujo viscoso que la parte del fluido en la superficie, tal como las paredes de un tubo, está esencialmente en reposo. Esta capa de fluido casi estacionario en la superficie, se llama a menudo "capa límite" y esta capa límite, tiene importantes implicaciones en los fenómenos de fluidos.

En la siguiente ilustración, constituye un diagrama universal de los TC. Está dividido por secciones, la parte sombreada corresponde a los TC de mayor utilización, La zona sombreada de la parte inferior que carece de punto es la de los TC de desplazamiento positivo. En dicho diagrama se toma la abscisa el coeficiente de caudal y como ordenada el coeficiente de presión. En él se ha trazado las líneas de $\sigma = cte$. A cada tipo de TC le corresponde una región específica del diagrama.

Los TC centrífugos son máquinas de número específicos de revoluciones inferiores a los TC axiales. Los TC centrífugos de admisión sencilla pueden diseñarse hasta alcanzar caudales mínimos de 500 m³/s y con admisión doble pueden alcanzar caudales de 290000 m³/s, por el contrario los TC axiales pueden alcanzar caudales mínimos de 1440 m³/s y pueden construirse para caudales de hasta 1000000 m³/s. pero esta capacidad en ambos casos de TC están limitadas a la capacidad de compresión realizada en un solo cuerpo de carcasa, es decir, los TC centrífugos pueden alcanzar relaciones de compresión de 10 a 12 los TC axiales no pueden lograrlo en un solo cuerpo, siendo así que en un solo cuerpo pueden alcanzar la relación de 6 a 8.

Ilustración 4. Grafica de Eckert, correspondiente a los coeficientes de presión ψ , caudal φ y número específico de revoluciones para cada TC.



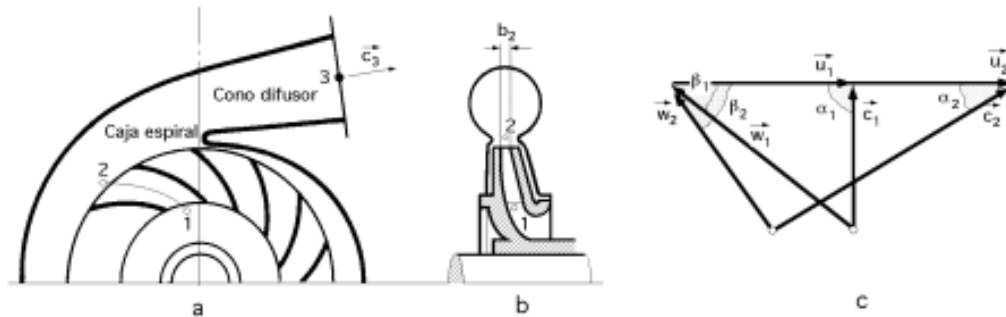
Fuente: turbomáquinas Claudio Mataix

4.1.1.1 Descripción de un TC centrífugo

Dentro de un compresor centrífugo ocurren 2 procesos estos son:

(1) Un aumento de la energía cinética del gas (presión dinámica), y también de la estática, este proceso tiene lugar en el rodete, que tiene como misión acelerar el gas, que es aspirado axialmente hacia el centro del rodete y cambia su dirección en 90° convirtiéndolo en flujo radial[2].

Ilustración 5. Vistas de un TC centrífugo, (a) corte transversal (b) corte meridional (c) triángulo de velocidades



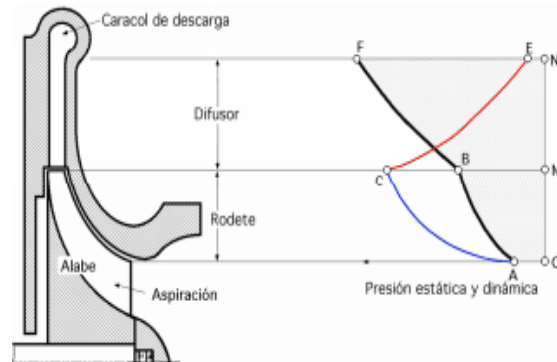
Fuente: Mecherwan P.- centrífugal compresor

Cuando el rodete de un TC centrífugo gira en presencia de un gas, la fuerza centrífuga le empuja desde la boca de entrada del rodete hasta el final del álabe. La velocidad del fluido a la salida del álabe originada por esta fuerza centrífuga es $\vec{w}_2$. Por otra parte, el fluido es empujado también en la dirección de la trayectoria del extremo exterior de alabe, punto donde la velocidad es $u_2 = r_2 \omega$.

Estas dos velocidades, que actúan simultáneamente sobre el fluido a la salida de alabe, se combinan para dar en dicha salida una resultante $\vec{c}_2$ que es en magnitud y sentido la velocidad absoluta a la que realmente el fluido abandona el álabe, cuyo valor suele ser del orden del 50-70% de $\vec{u}_2$, dependiendo del ángulo β_2 de salida.

(2) Disminución gradual sin turbulencias de la velocidad alcanzada por el gas en el rodete, consiguiendo como contrapartida una elevación de la presión estática. Este proceso tiene lugar en el difusor, en la siguiente ilustración se muestran los cambios de velocidad y presión estática que el gas experimenta a su paso por el TC centrífugo.

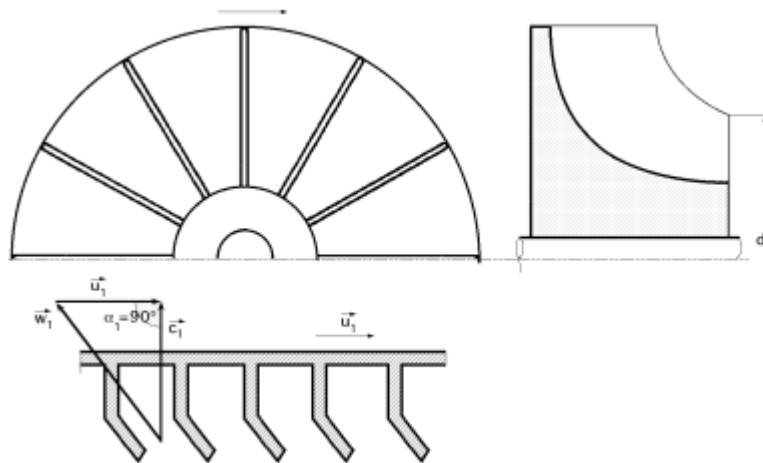
Ilustración 6. Presión estática y dinámica a la entrada del TC centrífugo.



Fuente: Mecherwan P.- centrífugal compresor

La entrada del TC centrífugo, el gas entra al TC por el dispositivo de admisión que debe garantizar una entrada del fluido uniforme al rodete con un mínimo de pérdidas, este dispositivo puede ser axial o acodado.

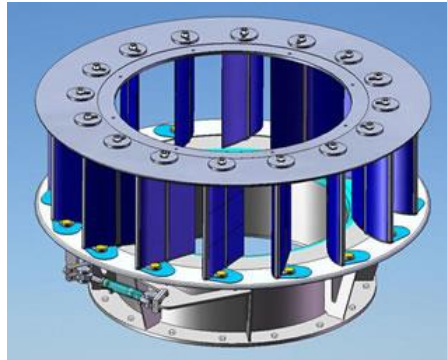
Ilustración 7. Rodete de entrada axial y salida radial



Fuente: turbomáquinas Claudio Mataix [1]

La entrada en el rodete sin rotación ($c_{1u} = 0$ o $\alpha_1 = 90^\circ$) condición de rendimiento máximo) es el caso más frecuente como se muestra en la ilustración 7; otras veces se la entrada hay una contra rotación ($c_{1u} > 0$), o una rotación ($c_{1u} < 0$). Para lo cual se coloca una corona directriz fija antes del rodete, dotada de alabes, que establece el ángulo de entrada α_1 más conveniente en cada caso. En la parte inferior de la ilustración 7 se representa la vista superior del desarrollo del cilindro en el radio en la base r_1 junto con el triángulo de velocidades para una entrada sin rotación ($c_{1u} = 0$). En algunos TC centrífugos de gran rendimiento a cargas intermedias, se coloca un difusor a base de una corona directriz de alabes orientables a la salida, que sirve además para regular el caudal.

Ilustración 8. Corona directriz de un TC centrífugo para una caldera

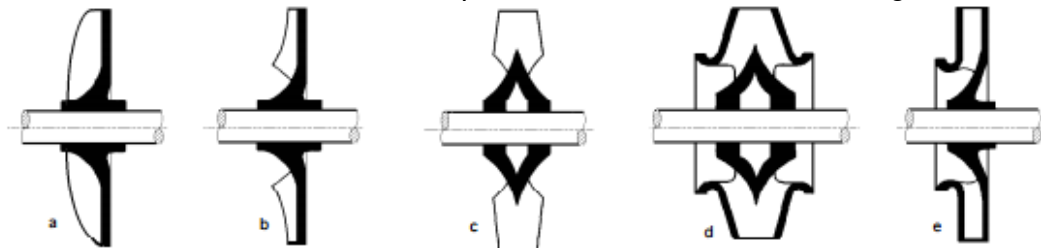


Fuente: www.dive-turbine.de

4.1.1.2 El rodete

Este elemento consta de un cierto número de álabes, que se fijan solamente al cubo del rodete, bien se fijan en un solo disco o a un lado del mismo, como en la siguiente ilustración que la figura representa (b) un rodete semiabierto de simple aspiración; o también pueden estar en uno y otro lado del disco, como en la ilustración muestra (c) un rodete semiabierto de doble aspiración, también si los álabes se fijan entre la superficie anterior de (a) y posterior a (b) como en la figura (d) rodete cerrado de doble aspiración y (e) cerrado de simple aspiración.

Ilustración 9. Diferentes tipos de rodetes en un TC centrífugo.



a) Abierto; b) Semiabierto de simple aspiración; c) Semiabierto de doble aspiración; d) Cerrado de doble aspiración;
e) Cerrado de simple aspiración

Fuente: www.pfernandez/compresores.com

De acuerdo a su forma estos tienen ciertas características tales como:

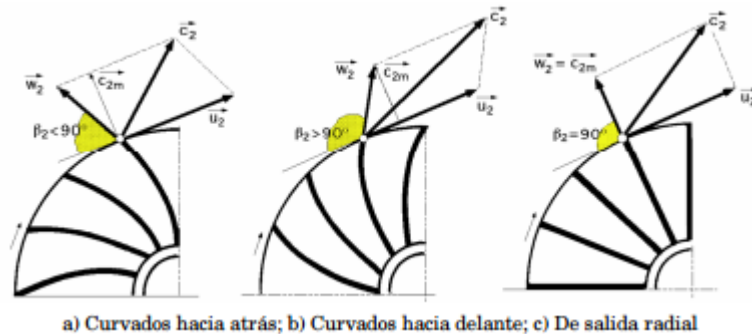
- El rodete (a) abierto tiene un mal rendimiento y poca resistencia; solo permite velocidades periféricas muy pequeñas por lo que cada vez es menos empleado.
- El rodete (e) tienen buen rendimiento, pero es de difícil construcción y solo permite velocidades periféricas moderadas.

- El rodete (b) es el más empelado en la actualidad debido a que se ha desarrollado diferentes métodos tales como: (1) mayor caudal, se ha logrado el aumento del diámetro de la boca de aspiración, disminuyendo el diámetro del cubo y aumento del rodete y la velocidad de rotación. (2) mayores relaciones de compresión, mediante los ángulos de salida grandes del orden de 90° y grandes velocidades de rotación.

El parámetro fundamental que caracteriza los álabes de un TC centrífugo es el ángulo de salida β_2 y, según este parámetro se clasifican los álabes:

- álabes curvados hacia atrás $\beta_2 < 90^\circ$ (a)
- álabes curvados hacia adelante $\beta_2 > 90^\circ$ (b)
- álabes de salida radial $\beta_2 = 90^\circ$ (c)

Ilustración 10. Diferentes disposiciones de álabes según el ángulo de salida

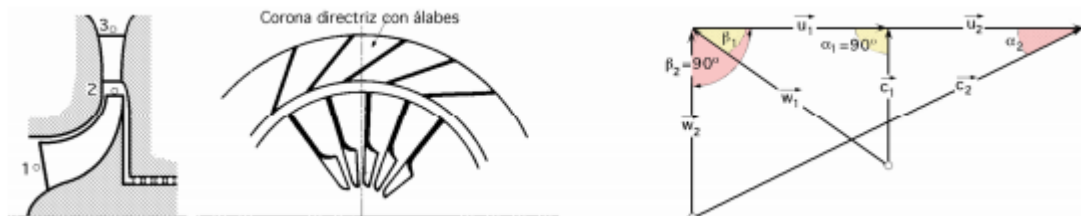


a) Curvados hacia atrás; b) Curvados hacia adelante; c) De salida radial

Fuente: www.pfernandez/compresores.com

La ilustración 12 representa un Tc centrífugo con álabes de salida radial, curvados a la entrada de tipo semiabierto; los antiguamente los TC radiales se construían así. La fijación de los álabes en este caso, a causa del esfuerzo centrífugo, exige una construcción del tipo de rodete cerrado como se muestra en la ilustración 9. Figuras (d). Aun con este tipo de construcción la velocidad periférica a la salida no suele exceder los 300 m/seg.

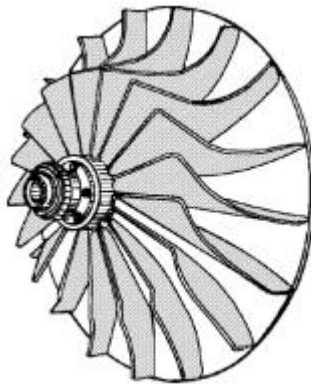
Ilustración 11. TC centrífugo con álabes del rodete curvados a la entrada y salida radial ($\alpha_1 = 90^\circ$ $\beta_2 = 90^\circ$)



Fuente: www.pfernandez/compresores.com

En la actualidad se emplea cada vez más la construcción de la ilustración 12, el tipo de rodete es semiabierto de la ilustración 9 con álabes de salida $\beta_2 = 90^\circ$, pero curvados a la entrada de tal manera que el ángulo β_1 de la velocidad relativa sea el exigido por una entrada radial de la corriente absoluta $\alpha_1 = 90^\circ$, sin rotación. La construcción con salida $\beta_2 = 90^\circ$, reduce los esfuerzos centrífugos prácticamente a esfuerzos de tracción; de ahí que para la fijación de los álabes solo se requieran un disco (rodete semiabierto); con este tipo de rodete se obtienen velocidades periféricas elevadas, pudiendo llegar a los 500m/seg.

Ilustración 12. Rodete TC con álabes de salida radial, curvados a la entrada del tipo semiabierto



Fuente: www.pfernandez/compresores.com

El sistema difusor:

Costa de uno o varios órganos fijos, cuya misión es recuperar una parte de la energía cinética a la salida del rodete, en otras palabras, conseguir un mejor rendimiento posible, a expensas de la energía cinética del rodete, un incremento adicional de presión.

El sistema difusor consta con amenos una caja espiral, a la cual se añade con frecuencia alguno de los siguientes elementos: (1) costa de caja espiral y cono difusor como se muestra en la ilustración 6. (2) en la ilustración 11 se muestra un TC centrífugo que posee una corona directriz con álabes, con lo cual se mejora en gran medida el rendimiento de la difusión.

En diseños sencillos se dispone una corona directriz sin álabes, que a veces queda reducida a una simple caja de paredes paralelas. La sensibilidad de esta corona sin álabes a los cambios de caudal es mucho menor, pero el rendimiento en el punto de diseño es inferior.

La velocidad periférica a la salida del rodete $\vec{u}_2$ influye en la presión p_2 que se alcanza en el rodete. La resistencia del rodete a los esfuerzos centrífugos limita esta velocidad $\vec{u}_2$, lo cual implica que la relación de compresión máxima que se alcanza

puede llegar, en algunos casos particulares, al valor 4 y aun mayor. La velocidad $\vec{u}_2$ máxima en los rodets de fundición de hierro está limitada a unos 40m/seg, mientras que los rodets de acero mecanizados pueden llegar hasta los 300 m/seg.

4.1.2 Relación de compresión en un TC centrífugo

Si se acepta que el Angulo de entrada $\alpha_1 = 90^\circ$, se demuestra que la relación de compresión máxima teórica que alcanza una sola etapa es de:

Ecuación 1. Relación de compresión

$$\varepsilon_c = \frac{p_3}{p_1} = \frac{\text{Presión absoluta en el escape}}{\text{Presión absoluta en la aspiracion}} = \left(\frac{\gamma - 1}{\gamma} \frac{u_2 c_{2u}}{R T_1} + 1 \right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}}$$

Si se desprecia w_2 frente a u_2 se cumple que $c_2 = u_2 = r_{2w}$ y por tanto que $u_2 = c_{2u}$ y $\beta_1 = 90^\circ$, por lo que la relación anterior quedaría de la siguiente forma:

Ecuación 2. Relación de compresión real

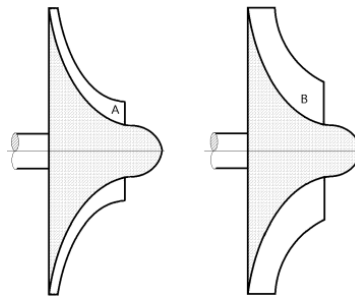
$$\varepsilon_c = \frac{p_3}{p_1} = \left(\frac{\gamma - 1}{\gamma} \frac{u_2^2}{R T_1} + 1 \right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}}$$

De la anterior ecuación se pueden sacar varias conclusiones debido a que el TC centrífugo gira a velocidad constante y desplaza un determinado fluido; cuando mayor sea la temperatura de entrada del gas menor será la relación de compresión generada. Como la relación de compresión conseguida no depende de p_1 sino de T_1 , implica que si un determinado compresor girando a una velocidad fija comprime el gas desde 1 bar a 3 bar, lo comprimiría también desde 0,2 bar hasta 0,6 bar, siempre que en ambos casos la temperatura T_1 a la entrada sea la misma.

Capacidad de los TC centrífugos:

Para alcanzar la presión p_3 deseada se necesita altas velocidades de rodete, lo que implica que los compresores centrífugos sean maquinas potencialmente capaces de desplazar grades caudales volumétricos: el volumen desplazado (medido en las condiciones de entrada) es función de la velocidad de giro y del tamaño de los pasajes, entre álabe y álabe, del rodete.

Ilustración 13. Rodetes que desplazan volúmenes diferentes y generan igual presión a la salida p_3



Fuente: turbomáquinas Claudio Mataix

En la ilustración 13, se representan dos rodetes A y B que desplazan volúmenes diferentes de fluido pero generan la misma presión p_3 a la salida. Si se supone, por ejemplo que el compresor B desplaza 4 veces lo que desplaza el compresor A, tendrá una capacidad 4 veces mayor; sin embargo, el costo del compresor B será mayor al compresor A.

Si las distancias entre los álabes del compresor A se reducen todavía más, no sucede lo mismo con su costo, aparte de las pérdidas de la carga en los álabes más estrechos habrían alcanzado valores excesivos. Esta es la razón por la que con TC centrífugos de pequeñas capacidades no son económicos, y si los de muy elevada capacidad. Esto no quiere decir que la construcción de TC centrífugos muy grandes no sea costosa a comparación de los de menor tamaño, pero el incremento de sus costos no está en misma proporción que el aumento de su capacidad, por lo que la construcción de TC centrífugos muy grandes es mucho más económica que su contraparte de menor tamaño.

4.1.3 Relación de compresión máxima en TC de varios escalonamientos:

Si se colocan unos cuantos rodetes en serie, como los representados en la ilustración 14, la relación de compresión total del turbocompresor es igual al producto de las relaciones de compresión de cada escalonamiento; si la relación de compresión es la misma para todos los escalonamientos, resulta igual a la enésima potencia de dicha relación, siendo Z el número de escalonamientos.

Ilustración 14. TC centrífugo de varios escalonamientos en corte meridional y corte radial.



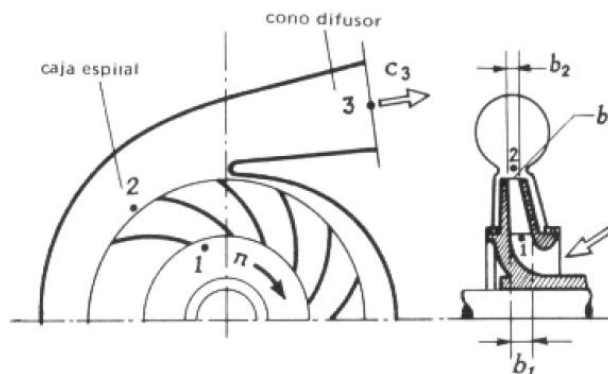
Fuente: Mecherwan P.- centrífugal compresor

En la ilustración 14. E es la entrada del rodete, R los alabes móviles, F la corona directriz con alabes fijos, que a costa de la energía cinética del fluido incrementa la presión del mismo, rodeando el diafragma D de separación entre los dos escalonamientos se encuentra el conducto inversor sin alabes I, de donde pasa el gas a la corona directriz de flujo centrípeto C, que constituye el elemento característico de los TC centrífugos de varios escalonamientos.

Estos álabes sirven para conducir el fluido a la entrada del rodete siguiente, aproximadamente, con la misma velocidad en modulo y dirección, que tenía a la entrada del primer rodete [en general la entrada en todos los rodetes es sin rotación es decir, $c_{1u} = 0$; $\alpha_1 = 90^\circ$]. Si la relación de compresión es pequeña se suele construir todos los rodetes iguales y con el mismo diámetro exterior, por lo que el salto entálpico en todos los rodetes es igual pero la relación de compresión no, debido al aumento de temperatura del fluido con la compresión.

4.1.3.1 Balance termodinámico, relación de compresión

Ilustración 15. TC rodete carcasa



Fuente: turbomáquinas Claudio Mataix

La relación de compresión ε_c que se obtienen en un escalonamiento que consta de rodete y difusor se muestra en la ecuación 3, en la que el subíndice 1 es la entrada en el rodete, 2 la salida del rodete y entrada en el difusor y 3 la salida del difusor.

Ecuación 3. Relación de compresión en TC centrífugo de un solo escalonamiento

$$\varepsilon_c = \frac{p_3}{p_1} = \frac{p_3}{p_2} \frac{p_2}{p_1}$$

Compresión isotrópica en el rodete: Aplicando la ecuación energía de un fluido en régimen estacionario según la primera ley de la termodinámica ente los puntos 1 y 2, algunas consideraciones para el balance son; compresor adiabático, no refrigerado son perdida de calor:

Ecuación 4. Balance por primera ley de la termodinámica al rodete

$$Q_{12} = h_2 - h_1 - \frac{c_2^2 - c_1^2}{2} w_{12}$$

$$Q_{12} = 0$$

El trabajo que se le trasfiere al fluido viene expresado por la ecuación de Euler, teoría unidimensional, en la siguiente forma:

Ecuación 5. trabajo específico

$$W_{12} = W_u = u_1 c_{1u} - u_2 c_{2u}$$

Como muchos gases y entre estos el aire, obedecen muy aproximadamente a la ecuación de los gases ideales; por lo cual:

Ecuación 6. Ecuación gases ideales

$$h_{2s} - h_1 = \bar{c}_p (T_{2s} - T_1)$$

Dónde: donde $\bar{c}_p$ es el calor específico medio del gas y T_{2s} la temperatura final de la compresión isotrópica. Sustituyendo las ecuaciones 5 y 6 en la ecuación 4 se tendrá:

Ecuación 7.

$$0 = \bar{c}_p (T_{2s} - T_1) + \frac{c_2^2 - c_1^2}{2} (u_1 c_{1u} - u_2 c_{2u})$$

Simplificando la ecuación se tiene:

Ecuación 8.

$$T_{2s} = T_1 + \frac{1}{2\bar{c}_p} [2(u_2 c_{2u} - u_1 c_{1u}) - (c_2^2 - c_1^2)]$$

Además en la compresión adiabática- isotrópica se tiene:

Ecuación 9.

$$\frac{T_{2s}}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}$$

Remplazando el término anterior en la ecuación 8.

Ecuación 10. Relación de compresión en el rodete (gas ideal y $\bar{c}_p$ y γ constantes)

$$\frac{p_{2s}}{p_1} \left\{ 1 + \frac{p_1}{2\bar{c}_p T_1} [2(u_2 c_{2u} - u_1 c_{1u}) - (c_2^2 - c_1^2)] \right\}^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}$$

Esta ecuación es importante porque relaciona los parámetros termodinámicos con las dimensiones del rodete, con su número de revoluciones y con la forma de los alabes que se refleja en c_{1u} y c_{2u} que depende de ella.

Compresión adiabática real: En el rotor real ($Q'_{12}=0$) la compresión que no es isotrópica, se comprueba experimentalmente que sigue una ley aproximadamente politrópica y por tanto:

Ecuación 11. Relación P

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}}$$

Donde:

T_2 : temperatura final real de la compresión.

n : exponente politrópica, que para el aire suele oscilar en los compresores adiabáticos de 1,45 a 1,7.

El rendimiento interno de la compresión en el rotor se definirá así en función de las entalpías:

Ecuación 12.

$$n_i = \frac{h_{2s\ tot} - h_{1\ tot}}{h_{2\ tot} - h_{1\ tot}} \approx \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1} \approx \frac{T_{2s} - T_1}{T_2 - T_1}$$

aproximadamente:

$$T_2 - T_1 = \frac{T_{2s} - T_1}{n_i}$$

Teniendo en cuenta esta última ecuación, la ecuación 8 se transforma en:

$$T_2 = T_1 + \frac{1}{2n_i\bar{c}_p} [2(u_2c_{2u} - u_1c_{1u}) - (c_2^2 - c_1^2)]$$

Y en consecuencia, la ecuación 10 quedara de la siguiente manera:

Ecuación 13.

$$\frac{p_2}{p_1} \left\{ 1 + \frac{p_1}{2\bar{c}_p n_i T_1} [2(u_2c_{2u} - u_1c_{1u}) - (c_2^2 - c_1^2)] \right\}^{\frac{n-1}{n}}$$

Relación de compresión adiabática en el sistema difusor: aplicando el mismo principio entre los puntos 2 y 3 (ilustración 15). Entre estos dos puntos no se ejerce trabajo alguno sobre el fluido ($W=0$). En la compresión (difusor) a.í se tendrá:

Ecuación 14.

$$\bar{c}_p T_2 + \frac{c_2^2}{2} = \bar{c}_p T_{3s} + \frac{c_3^2}{2}$$

De donde:

$$\frac{p_{3s}}{p_2} = 1 + \frac{c_2^2}{2\bar{c}_p T_2} \left(1 - \frac{c_3^2}{c_2^2} \right)$$

Y en virtud de la ecuación 11, aplicada entre los puntos 3s y 2:

Ecuación 15. Relación de compresión a.i en el difusor; gas ideal y $\bar{c}_p$ y γ constantes

$$\frac{p_{3s}}{p_2} = \left[1 + \frac{c_2^2}{2\bar{c}_p T_2} \left(1 - \frac{c_3^2}{c_2^2} \right) \right]^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}$$

En la compresión (difusión) real politrópica un razonamiento análogo al utilizado en la deducción de la ecuación 13 nos conduce a la siguiente expresión:

Ecuación 16.

$$\frac{p_3}{p_2} = \left[1 + \frac{c_2^2}{2\bar{c}_p n_i T_2} \left(1 - \frac{c_3^2}{c_2^2} \right) \right]^{\frac{n}{n-1}}$$

Donde:

n_i : es el rendimiento interno del difusor, que podemos suponer una aproximación que es igual al del rodete y al de todo el escalonamiento. Este rendimiento en rodetes estacionarios puede oscilar entre 0,75 a 0,9.

4.1.4 Selección del ángulo de salida de los álabes β_2 en un rodete radial de baja presión

Si se supone emplear la teoría unidimensional, que todos los escalonamientos tienen el mismo diámetro d_2 , entrada radial $c_{1u} = 0$ y $\alpha_1 = 90^\circ$, y que en cada uno de ellos (escalonamiento) el fluido se comporta incompresible, es decir, se desprecia la variación de su volumen específico, así como las pérdidas de carga, se puede estudiar fácilmente la variación de las características de un escalonamiento radial en función del ángulo β_2 y obtener conclusiones que puedan ayudar a entender la selección de este ángulo. El despreciar la variación de volumen específico convierte el TC centrífugo en un turbomáquina hidráulica generadora, o sea en una bomba centrífuga, o en un ventilador. El error que se comete en este supuesto puede ser grande, tanto mayor cuanto mayor sea la relación de compresión del escalonamiento. La energía transmitida al fluido en un escalonamiento es:

Ecuación 17.

$$Y_u = U_2 C_{2u}$$

Del triángulo de velocidades de la salida se deduce:

Ecuación 18.

$$C_{2u} = U_2 - C_{2m} \operatorname{ctg} \beta_2$$

Al remplazar la ecuación 18 en la ecuación 17 se tiene:

Ecuación 19.

$$Y_u = U_2^2 \left(1 - \frac{C_{2m}}{U_2} \operatorname{ctg} \beta_2 \right)$$

Por otra parte, teniendo en cuenta la segunda expresión de la ecuación de Euler, y suponiendo para simplificar que $c_{1m} = c_{2m}$, la energía dinámica del rodete vendrá expresada por:

$$c_{2m} = \frac{c_2^2 - c_1^2}{2} = \frac{c_{2m}^2 + c_{2u}^2 - c_{1m}^2}{2} = \frac{c_{2u}^2}{2}$$

Introduciendo la ecuación 18. A la expresión anterior (segunda expresión de Euler):

Ecuación 20. Presión dinámica

$$Y_{din} = \frac{u_2^2}{2} \left(1 - \frac{C_{2m}}{u_2} \operatorname{ctg} \beta_2 \right)^5$$

El grado de reacción σ se podrá representar así:

$$\sigma = 1 - \frac{Y_{din}}{Y_u} = 1 - \frac{\frac{u_2^2}{2} \left(1 - \frac{C_{2m}}{u_2} \operatorname{ctg} \beta_2 \right)^2}{u_2^2 \left(1 - \frac{C_{2m}}{u_2} \operatorname{ctg} \beta_2 \right)}$$

Según las ecuaciones 19 y 20 se puede deducir:

Ecuación 21. Grado de reacción

$$\sigma = 1 - \frac{1}{2} \left(1 - \frac{C_{2m}}{u_2} \operatorname{ctg} \beta_2 \right) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \frac{C_{2m}}{u_2} \operatorname{ctg} \beta_2$$

La energía de presión en el rodete será:

Ecuación 22. Presión de rodete

$$Y_p = \frac{u_2^2 - u_1^2}{2} + \frac{w_2^2 - w_1^2}{2} = \frac{u_2^2 - u_1^2 + w_2^2}{2} - \frac{w_2^2}{2} = \frac{u_2^2 - u_1^2 + w_2^2}{2} - \frac{1}{2} \frac{C_{2m}^2}{\operatorname{sen}^2 \beta_2}$$

Las ecuaciones 19 al 22 nos dan la variación de Y_u , Y_{din} , σ , Y_p en función del ángulo β_2 de salida.

⁵ Y_{din} (m^2/s^2) representa la presión dinámica que comunica el rodete al fluido, o energía la energía cinética por unidad de masa.

Con las anteriores ecuaciones que se dedujeron puede verse en la ilustración 16, que β_2 puede oscilar entre un valor mínimo menor a 90° y un valor máximo mayor a 90° (siendo los ángulos máximo y mínimo suplementarios) en efecto:

- Según la ecuación 19 al disminuir β_2 disminuye Y_u hasta hacerse cero.

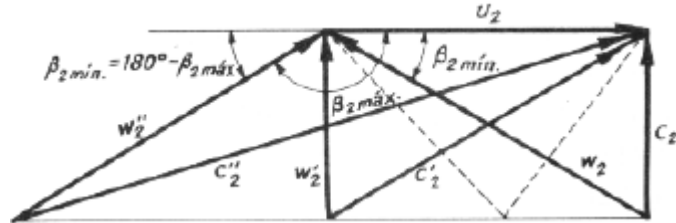
Ecuación 23.

$$\operatorname{tg} \beta_2 = \frac{C_{2m}}{u_2}$$

- Según la ecuación 21 el grado de reacción por el contrario disminuye al aumentar β_2 hasta hacerse cero para

$$\operatorname{tg} \beta_{2 \max} = -\frac{C_{2m}}{u_2} \quad \{\beta_{2 \max} = 180^\circ - \beta_{2 \min}\}$$

Ilustración 16. Valores máximo y mínimo del ángulo β_2



Fuente: turbomáquinas Claudio Mataix

Teóricamente puede concebirse un TC centrífugo con $\sigma < 0$; pero siendo la finalidad del compresor producir un aumento de la presión, el rodete con $\sigma < 0$ producirá solo energía dinámica e incluso trasformaría una parte de la energía de presión a la entrada en energía dinámica. A continuación el sistema difusor tendría la misión de trasformar toda esa energía dinámica en energía de presión. Este TC tendría un rendimiento inaceptable, por lo cual justamente se establece el límite máximo de β_2 por la ecuación 21 mediante la condición $\sigma = 0$.

β_2	Y_u	Y_{din}	Y_p	σ
β_{2min}	0	0	0	0
$\beta_{2min} < \beta_2 < 90^\circ$	Aumenta con β_2	Aumenta con β_2	Aumenta con β_2	$1 > \sigma > 1/2$
β_2	u_2^2	$u_2^2/2$	$u_2^2/2$	$1/2$
β_2	Aumenta con β_2	Aumenta con β_2	Disminuye con β_2	$1/2 > \sigma > 0$
β_{2max}	$2u_2^2$	0	$2u_2^2$	0

Tabla 2. Comparación de diferentes parámetros con diferentes β_2

Todos los escalonamientos que se comparan en la anterior tabla tiene el mismo tamaño ($d_2=\text{constante}$), la mismas rpm y entrada radial. Cuando mayor sea el ángulo β_2 mayor será la energía transmitida al fluido en cada rodete Y_u , menor el número de escalonamientos necesarios y más bajos el coste del TC; pero al aumentar β_2 disminuye el grado de reacción y siendo el proceso el difusor de bajo rendimiento, se empeora en general el rendimiento del TC. De acuerdo a algunos ensayos llevados a cabo por Kluge demuestran que los mejores rendimientos se obtienen con ángulos β_2 entre 25 y 50°. Sin embargo son valores corrientes de β_2 en los TC centrífugos los comprendidos entre 25 a 60° [3].

Según la ecuación 23, y teniendo en cuenta que:

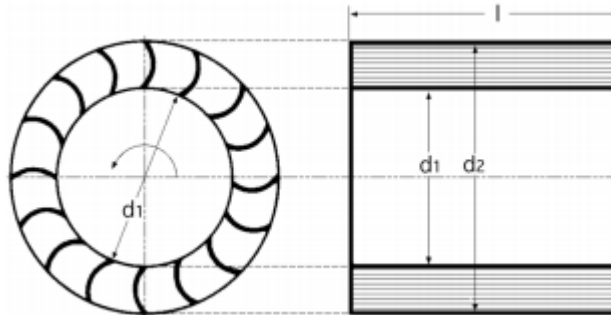
$$C_{1m} = C_{2m}$$

$$\operatorname{tg} \beta_2 = \frac{C_1}{U_1} (\text{entrada radial})$$

Se tendrá:

$$\operatorname{tg} \beta_2 = \frac{C_{1m}}{U_1 \frac{d_2}{d_1}} = \frac{d_1}{d_2} \operatorname{tg} \beta_1$$

Ilustración 17. Rodete siroco.



Fuente: turbomáquinas Claudio Mataix

Luego el límite inferior del ángulo β_2 depende para un ángulo determinado de β_1 de la relación de diámetros y aumenta al aumentar d_1/d_2 , tendiendo hacia el límite $\beta_{2\min} = \beta_1$, para $\frac{d_1}{d_2} \approx 1$. Por esta razón los alabes de los rodetes siroco se construyen con alabes curvados hacia adelante como se muestra en la ilustración 17. Este tipo de rodetes tiene sentido de giro contrario a las manecillas del reloj y es muy empleado en los ventiladores.

4.1.5 Factor de disminución de trabajo de los TC centrífugos

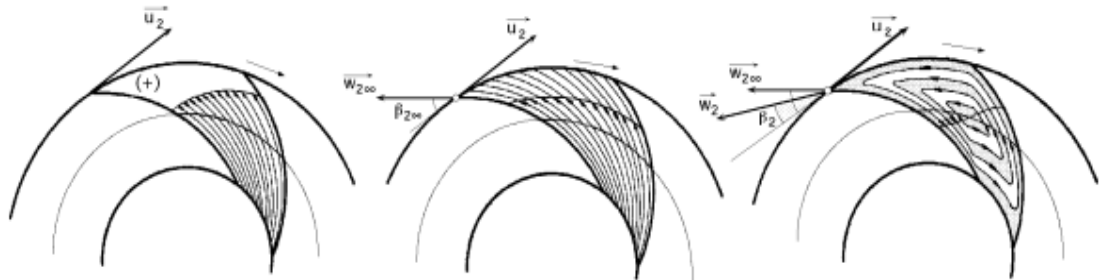
En el diseño de un TC es preciso calcular a partir de los datos iniciales el salto periférico en el rodete, expresado por la ecuación de Euler, que se precisa para conseguir la relación de presiones deseada. La determinación de este salto es necesaria porque en la ecuación de Euler se encuentra por la base inicial para el diseño de rodete en forma general.

El procedimiento será el siguiente:

- Se lee en el diagrama h-s el salto adiabático isotrópico.
- Se divide dicho salto por el rendimiento interno para obtener la energía comunicada al fluido en el rodete.

Si la teoría unidimensional fuera cierta, el salto así obtenido sería expresado por la ecuación de Euler; sin embargo, este rodete calculado de esta forma no alcanza en el banco de pruebas la presión deseada. Esto se debe a que la teoría unidimensional no es más que una aproximación de la realidad donde en esa teoría supone un número infinito de álabes, cuando en realidad en el rodete el número de álabes es necesariamente finito.

Ilustración 18. Torbellino potencial en el rodete de un TC centrífugo.



Fuente: Mecherwan P.- *centrifugal compresor*

El comportamiento en un TC con número de álabes finitos. Aunque lógicamente la velocidad relativa a la salida del rodete debería ser W_2 bajo un ángulo β_2 igual al ángulo material del alabe a la salida (mirar ilustración 18), la teoría y la experiencia demuestran que la velocidad relativa efectiva a la salida del rodete es w_2' bajo un ángulo $\beta_2' < \beta_2$ siendo este último el ángulo del alabe. Este hecho encuentra su explicación en la teoría del fluido ideal irrotacional, en el cual se originan un torbellino relativo, en el rodete real con número finito de álabes la corriente no es perfectamente guiada por los álabes, sino que a la corriente relativa de desplazamiento del gas en el rodete se supone un torbellino potencial representado en la ilustración 18, por las curvas cerradas o un giro relativo de la corriente en el espacio comprendido entre cada dos álabes. Al calcular el rodete se suele postular inicialmente como fluido ideal e irrotacional. En este movimiento del fluido ideal,

según enseña la teoría potencial, las partículas de fluido en su movimiento absoluto no pueden girar. Debido a esto, al girar el rodete se genera los torbellinos relativos en sentido opuesto al del giro del rodete, que se representa en la ilustración 18. Este torbellino relativo sumado al desplazamiento relativo inclina al vector W_2 en la periferia del rodete y hace disminuir el ángulo efectivo de la corriente hasta el valor β'_2 . Es decir, la corriente sufre un desplazamiento. De ahí el nombre de factor de deslizamiento con que a veces se designa el factor de corrección e_z que tiene en cuenta este fenómeno. Según la experiencia el factor e_z , oscila entre 1,02 y 1,07, aunque en algunas ocasiones se presenta un valor de 1,04.

Stodola ha deducido la siguiente fórmula para el factor de deslizamiento [4]:

Ecuación 24.

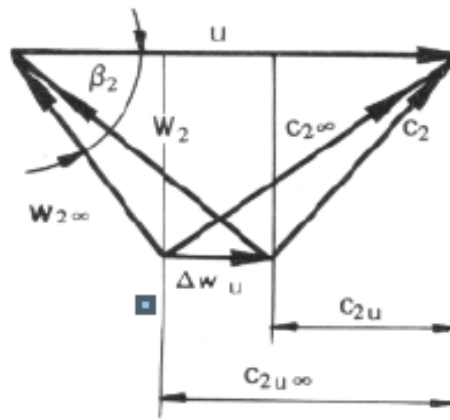
$$e_z = 1 - \frac{\pi \operatorname{sen} \beta_2}{Z}$$

Dónde: Z es el número de alabes del rodete.

El deslizamiento aumenta al aumentar el valor de β_2 o al disminuir z .

Siguiendo la metodología y terminología alemana denominaremos a este coeficiente factor de disminución de trabajo. En efecto, como se ve en la ilustración 19.

Ilustración 19. Triangulo de salida de un TC centrífugo con número infinito y finito de álabes.



Fuente: turbomáquinas Claudio Mataix

$$W_{2\infty} = W_2 + \Delta W_u$$

Dónde: ΔW_u es el incremento de componente periférica de la velocidad relativa debida al torbellino relativo, por tanto $C_{2u} < C_{2u\infty}$. Luego la energía teórica si suponemos entrada radial $c_{1u}=0$, continuara con número finito de álabes, Y_u será

$Y_u = u_2 c_{2u}$ mientras que con número infinito de alabes será $Y_u = u_2 c_{2u}$ siendo $c_{2u} < c_{2u\infty}$ se tendrá $Y_u < Y_{u\infty}$ y según Stodola:

$$\frac{Y_u}{Y_{u\infty}} = e_z$$

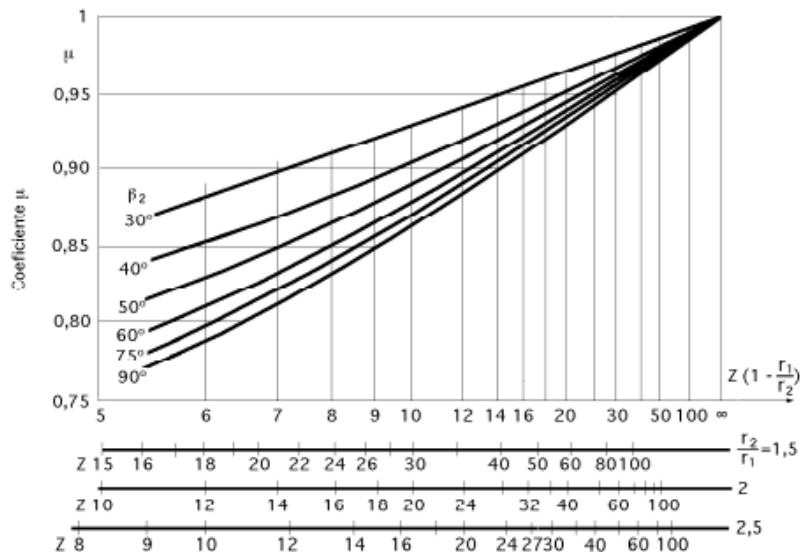
Eck ha desarrollado una fórmula que concuerda más con los valores experimentales, introduciendo el influjo de la fuerza centrífuga mediante la relación d_1/d_2 :

Ecuación 25. Formula de Eck para el factor de disminución de trabajo.

$$e_z = \frac{1}{1 + \frac{\pi \sin \beta_2}{2z \left(1 - \frac{d_1}{d_2}\right)}}$$

Esta ecuación se representa gráficamente en la ilustración 20 por un grupo de curvas que serán muy útiles para el diseño del *impeller*.

Ilustración 20. Abaco para calcular el coeficiente e_z



Fuente: turbomáquinas Claudio Mataix

4.1.5.1 Procedimiento de cálculo de un TC radial

Par comenzar con el diseño de un compresor se tiene que seleccionar dimensiones, velocidades, rendimiento, ángulos, etc. Para lo cual se debe guiar por su propia experiencia, así como por los estudios teóricos y experimentales realizados. Cuyos resultados están condensados resumidos en gráficas, curva y ecuaciones. Los ensayos con modelos escalados, efectuados por fabricantes en el desarrollo de nuevos proyectos, confirman hipótesis realizadas e indican, en casos contrarios, como conviene modificar el diseño.

Los datos iniciales, que se requieren para realizar el proyecto de un TC radial son los siguientes:

- Caudal másico G o volumétrico Q , este último, en el estado que tiene el gas en la admisión debido a que Q es variable.
- Estado inicial del gas, determinando generalmente por su presión P_e y su temperatura t_e
- presión final P_f o equivalente, relación de compresión $\epsilon_c = \frac{P_f}{P_e}$
- gas a comprimir, cuyas características termodinámicas, en particular R y γ deben ser conocidas.

Además, en casos particulares, se fijan otros datos iniciales, que no pueden por tanto variarse en el diseño, tales como el número de revoluciones, diseño a área frontal mínima.

En la decisión si el compresor habrá o no habrá de ser refrigerado intervienen los siguientes factores:

- evaluación económica del ahorro de energía que se obtendrá con la refrigeración y el mayor capital invertido en una maquina más costosa.
- Conveniencia o no de la refrigeración según el fin a que se destine el aire comprimido
- Materiales que se emplearan en la construcción del rotor, junto con el número de revoluciones del mismo.
- Gastos de mantenimiento masi como interrupciones de servicio, que son mayores en el compresor refrigerado, a causa de la limpieza de las camisas de agua y de los refrigeradores intermedios, si se ha de mantener un rendimiento isotérmico elevado.

4.1.5.2 Elección del número de revoluciones n .

El número de revoluciones depende del tipo de accionamiento del TC. Con frecuencia este es un motor eléctrico asíncronico. Entonces el número de revoluciones más frecuente es de 2950 rpm (motor de un par de polos), menos frecuente 1430 rpm (motor de dos paredes de polos), teniendo en cuenta el deslizamiento en carga nominal. A veces se intercala una transmisión, y se escoge

un número de revoluciones mayor; existiendo entonces un margen grande en la selección de este número. Con frecuencia se suele utilizar como motor de accionamiento la Turbina de Vapor, con o sin transmisión reductora; en el primer caso cuando se requieren velocidades del compresor de 2500 a 3500 rpm, y en el segundo cuando se requieren velocidades muchos mayores.

El accionamiento por Turbina Vapor tiene la ventaja es una amplitud grande en la selección del número de revoluciones, así como de una regulación del caudal por variación de este número. Regulación que es siempre la que conserva mejor rendimiento a cargas intermedias. En los TC el número de revoluciones se escoge preferentemente con un criterio de óptimo rendimiento del grupo; aunque este criterio a veces se abandona por consideraciones de espacio o de resistencia. Los modernos turborreactores equipados con compresor centrífugo giran a velocidades que ostentan entre 11000 y 34000 rpm aproximadamente.

Ecuación 26.

$$\Delta_p = \frac{\rho \psi u_2^2}{2}$$

Siendo la ecuación 26, el incremento de presión directamente proporcional a la densidad, para conseguir relaciones de presión elevadas se necesitaran velocidades periféricas y rpm mucho más elevadas en un TC de aire que en una bomba de agua. Si una misma maquina a la misma n impulsa aire producirá un Δ_p aproximadamente 833 veces menos (siendo 833 aproximadamente la relación de las densidades del agua y aire) que si impulsara agua. Por tanto, si se quiere que dicha maquina produzca el mismo Δ_p impulsando aire, deberá girar a $n_3 = \sqrt{833} \approx 30 n_{ag}$. O sea a una n 30 veces mayor. De ahí que el TC es una maquina mucho más revolucionada que la Bomba y de mayor ruido.

La n de los TC oscila entre las 300 y las 25000 rpm. En casos especiales (sobre todo es los turbosobrealimentadores) se llega hasta las 100000 rpm.

El número de revoluciones en los TC, lo mismo que en las restantes TM, influye decisivamente en las dimensiones de la máquina. Al aumentar las rpm disminuye el tamaño a igual potencia.

4.1.5.3 Determinación del número de escalonamientos Z

Una vez fijado el número de revoluciones puede ya pasarse a la determinación del número de escalonamientos Z del compresor. En grupos estacionarios no suele pasarse de una relación de compresión $\epsilon_c = 2$ a 2,5. Forzando más el diseño se puede llegar hasta $\epsilon_c = 4$ a 4,5. Para relaciones de compresión mayores se requiere la construcción de varios escalonamientos en serie, cuyos rodets se fijan a un mismo eje. Entonces se verifica que:

$$\epsilon_c = \epsilon_1 \epsilon_{11} \dots \dots \epsilon_n$$

Donde: ϵ_c son las relaciones de compresión de cada escalonamiento.

Los valores siguientes pueden considerarse usuales:

Para: $\epsilon_c = 1,1$ a $1,5 \dots \dots \dots z = 2$ escalonamientos

$\epsilon_c = 1,5$ a $2,5 \dots \dots \dots z = 4$ escalonamientos

$\epsilon_c = 2$ a $4 \dots \dots \dots z = 4$ a 6 escalonamientos

En la actualidad para $\epsilon_c = 7$ a 10 se utilizan de 9 a 11 escalonamientos. Para un valor de $\epsilon_c = 600$ realizable con un TC radial hacen falta aproximadamente 30 escalonamientos. Sin embargo, para evitar el fenómeno de bombeo no deben alojarse en el mismo cuerpo o carcasa más de 9 a 12 escalonamientos.

Si las relaciones de compresión de todos los escalamientos son iguales se tendrá:

$$\epsilon_{cc} = \sqrt[n]{\epsilon_c}$$

Donde: ϵ_{cc} es la relación de compresión de un solo escalonamiento.

Una vez fijado el número de revoluciones con él y con los datos iniciales se puede calcular el valor de n_q por la ecuación 27, ya que $Q=Q_e$ es conocido y en Y_s se calcula fácilmente con los datos iniciales para unidad completa. Calculando n_q mediante la ilustración 21 se calcula el valor inicial de σ también para todo el compresor.

Ecuación 27. Número específico de revoluciones en función del caudal

$$n_q = n_{11} \sqrt{Q_{11}} = \frac{n d \sqrt{g} \sqrt[4]{Q} \sqrt[4]{g}}{d \sqrt[4]{\Delta Y_s} \sqrt{\Delta Y_s}} = 5,5431 n Q^{1/2} \Delta Y_s^{-3/4}$$

Donde: ΔY_s es el salto energético adiabático- isentrópico en el escalonamiento y Q es el caudal volumétrico en las aristas de baja presión. ΔY_s Tiene como definición: en los TC la diferencia de entalpías.

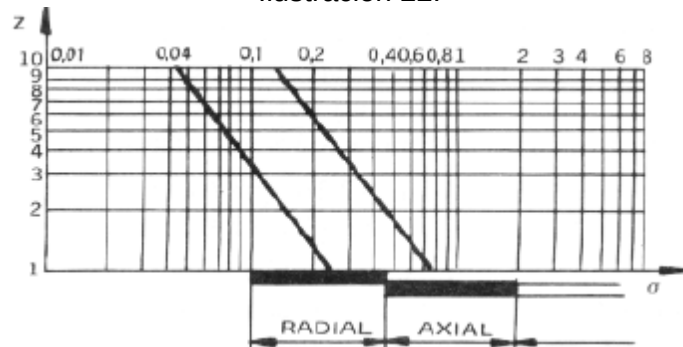
Ilustración 21. Coeficiente numérico de trasformada de las distintas formas del número específico de revoluciones.

	n_q rpm $(m^3/s)^{1/2} m^{-3/4}$	n_s rpm $(CV)^{1/2} m^{-5/4}$	n_0 adimensional	σ adimensional
$n_q =$	1	0,274	333	$158,13 \left(\frac{\rho_{tot}}{\rho_{est}} \right)^{1/2}$
$n_s =$	3,65	1	1216	$577 \left(\frac{\rho_{tot}}{\rho_{est}} \right)^{1/2}$
$n_0 =$	$3 \cdot 10^{-3}$	$822 \cdot 10^{-6}$	1	$0,4744 \left(\frac{\rho_{tot}}{\rho_{est}} \right)^{1/2}$
$\sigma =$	$6,324 \cdot 10^{-3} \left(\frac{\rho_{est}}{\rho_{tot}} \right)^{1/2}$	$1733 \cdot 10^{-3} \left(\frac{\rho_{est}}{\rho_{tot}} \right)^{1/2}$	$2,108 \left(\frac{\rho_{est}}{\rho_{tot}} \right)^{1/2}$	1

Fuente: turbomáquinas Claudio Mataix

Con el valor de σ hallado puede ya leerse la ilustración 22, que nos da una estimación del número de escalonamientos. Los valores del número de escalonamientos Z de esta ilustración son medios razonables, confirmados por la experiencia y no representan un número mínimo de escalonamientos que en ningún caso se posible reducir:

Ilustración 22.

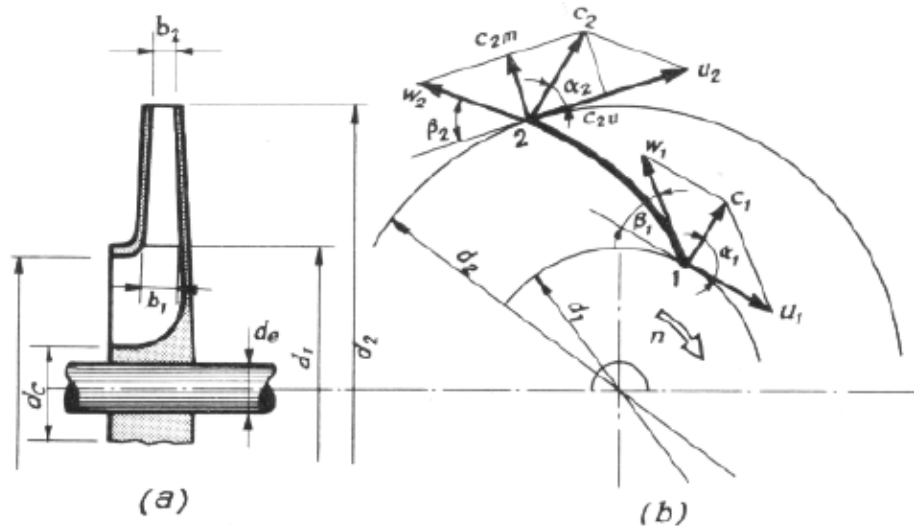


Fuente: turbomáquinas Claudio Mataix

4.1.6 Cálculo de las dimensiones principales.

Las dimensiones principales, que determinan la forma del rodete que se muestran en la ilustración 23, son: diámetro de eje d_e ; además a la entrada del rodete d_1 , b_1 y β_1 . Y a la salida del mismo d_2 , b_2 , y β_2 . Finalmente el diámetro del cubo d_c y el diámetro de la boca del rodete d_a .

Ilustración 23. Dimensiones principales de un rodete de TC radial (a) corte meridional (b) corte transversal.



Fuente: turbomáquinas Claudio Mataix

4.1.6.1 Criterios previos para la estimación de u_{max} y β_2 .

La velocidad periférica máxima de un TC tiene lugar a la salida del rodete del primer escalonamiento. Esta velocidad viene limitada por el esfuerzo centrífugo máximo que puede soportar el rodete, según los materiales y el tipo de construcción del rotor elegido. En los compresores estacionarios no se suele exceder la velocidad de 300 m/s.

Los tres tipos de rodete de la ilustración 10, que se vieron en la sección 7.2.1 corresponden a ángulos β_2 menor o igual a 90° .

Para facilitar la comparación de los tres tipos, supondremos que en los tres casos no varían las condiciones de entrada en el rodete, es decir, supondremos que no varían d_1 , b_1 y β_1 , $c_1=c_{1m}$ (entrada radial), y que son iguales también el diámetro exterior d_2 , b_2 , y β_2 , c_{2m} . En la misma ilustración se han dibujado los triángulos de velocidad a la salida de los tres rodetes. Se puede observar: [1]

- (1) La energía cinética a la salida del rodete es máxima con álabes curvados hacia adelante (ilustración 10-b), mínima con álabes curvados hacia atrás (ilustración 10-a), e intermedia con álabes de salida radial (ilustración 10-c). Lo mismo sucede con la componente c_{2u} . Luego para un mismo tamaño el tipo b es el que proporciona mayor trabajo.
- (2) La energía cinética que hay que transformar en presión en el difusor por el contrario es máxima en el tipo b, mínima en el tipo a e intermedia en el tipo c. según esto, como el rendimiento del difusor es bajo, el menor rendimiento corresponde al tipo b.
- (3) El tipo b además es el menos estable. Es decir, su curva característica de gran pendiente reduce la zona de utilización del compresor, que es aquella

en que no se produce el fenómeno del bombeo. Por eso el empleo del compresor del tipo b se limita a aquellos casos en que se necesitan grandes cantidades de gas con presiones estáticas pequeñas, por ejemplo, en la refrigeración por aire y en la ventilación. En esta clase de aplicaciones el grado de reacción pequeño no es un inconveniente.

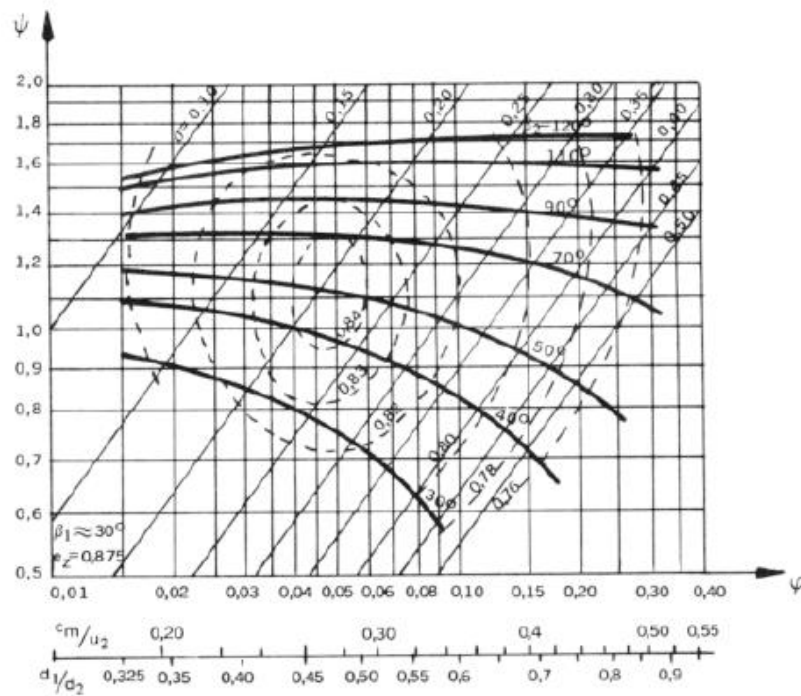
- (4) El tipo c ha sido muy utilizado en los TC de los motores (Turbina de gas), debido a sus buenas características junto con la mayor facilidad de fabricación por mecanizado de rodete, forjado de una pieza. El forjado de un rodete con álabes curvados hacia adelante o hacia atrás resulta más complicado.

El rodete del tipo c permite velocidades periféricas superiores a los 540 m/s. se utiliza por tanto cuando hace falta gran caudal, disminución de esfuerzos y peso reducido, como en los turbosobrealimentadores de los motores alternativos y en los turborreactores. El rodete del tipo a es por el contrario el preferido en las aplicaciones estacionarias, a causa de su mayor rendimiento y de su línea característica más estable[1].

4.1.6.2 Estimación simultanea de β_2 , u_2 y de d_1/d_2

Eckert [5], a base de deducciones teóricas y experimentales ha preparado un diagrama reproducido en la ilustración 24, que permite la selección de las dimensiones principales del rodete o el ángulo β_2 y la velocidad periférica u_2 . La velocidad periférica u_2 determina el tamaño del rodete (o lo que es lo mismo el diámetro exterior d_2) una vez fijado el número de revoluciones. Además, mediante el grafico auxiliar, trazado al pie de la misma figura, puede determinarse la relación de diámetros d_1/d_2 . Frecuentemente $d_1/d_2 = 0,5$. Para el trazo de este diagrama se ha puesto $\beta_1 = 30^\circ$ y un factor de deslizamiento $e_z = 0,875$. En el mismo diagrama figuran las curvas de trazos del rendimiento interno del escalonamiento.

Ilustración 24. Diagrama de Eckert para la estimación de las dimensiones principales de un TC radial.



Fuente: turbomáquinas Claudio Mataix

Para utilizar la ilustración 24, se procederá de la manera siguiente:

- A partir de los datos iniciales y de la estimación ya realizada del número de escalonamientos, se calcula el numero específico de revoluciones σ_e del escalonamiento (distinto del calculado anteriormente que se refiere a todo el compresor).
- Para el σ calculado se tendrá normalmente a realizar el mejor rendimiento posible. Esto determina, gracias a las curvas de rendimiento trazadas, los coeficientes de caudal φ y de presión ψ .
- Se lee en el grafico el ángulo β_2
- Con el coeficiente ψ se calcula u_2
- Para el coeficiente φ hallado se lee en el diagrama auxiliar del pie de la figura la relación de diámetros d_1/d_2 .

En la siguiente tabla se expresa la relación que suele existir entre β_2 y el coeficiente ψ en los TC radiales que han demostrado buen rendimiento [1]:

Tabla 3. Relación de β_2 y el coeficiente ψ

β_2	20°	25°	30°	35°	40°	50°	60°	80°	90°
ψ	0,7	0,8	0,85	0,92	0,98	1,1	1,23	1,48	1,6

Fuente: turbomáquinas Claudio Mataix

Los valores más frecuentes de ψ están comprendidos entre 0,9 a 1,1. Los TC radiales con alabes curvados hacia adelante ($\beta_2 > 90^\circ$) tienen coeficientes de presión más elevados del orden de 1,2 a 1,4.

4.1.7 Triángulos de velocidad en el rodete.

Triángulo de salida del rodete:

La componente meridional de la velocidad absoluta suele estar comprendida entre los límites siguientes: $c_{2m} = (0,22 \text{ a } 0,32) u_2$. De esta manera con u_2 , β_2 y c_{2m} queda determinado el triángulo de salida.

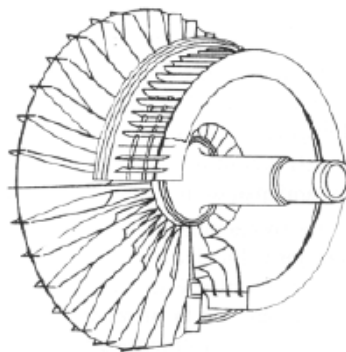
En los TC ligeros de las turbinas de gas los ángulos α_2 suelen estar comprendidos entre lo 14° y 16° .

Triángulos de entrada en el rodete:

En el triángulo de entrada conocemos hasta ahora $u_1 = u_2 \frac{d_1}{d_2}$. Experimentalmente se ha comprobado que el ángulo β_1 óptimo es aproximadamente 30° .

El ángulo α_1 suele ser de 90° en todas las TMG, en este caso el triángulo de entrada queda determinado si $\alpha_1 \pm 90^\circ$ puede determinarse el triángulo de entrada mediante la condición frecuente realizada de que $c_{1m} = c_{2m}$. Sin embargo, si el diseño es tal que la velocidad relativa a la entrada w_1 se acerca a la velocidad del sonido, el número de Mach $M_a = W_1/a_1$ empieza a tener influjo apreciable en el rendimiento; pueden disminuirse los efectos perjudiciales debido a la compresibilidad, aumentar el rendimiento y mejorar el funcionamiento del TC haciendo que la corriente entre en el rodete con una rotación positiva, o sea $c_{iu} > 0$, $\alpha_1 < 90^\circ$. Es fácil ver que con esta medida disminuye el número de Mach. Este caso tiene lugar frecuentemente en los TC de los turborreactores.

Ilustración 25. TC centrífugo de un turborreactor con corona directriz a la entrada.



Fuente: turbomáquinas Claudio Mataix.

La corriente espontáneamente entra en el rodete sin rotación $c_{1u}=0$. Para conseguir que $c_{1u}=0$ es preciso disponer una corona fija al estator de la maquina antes del rodete, como se puede ver en la ilustración 25, que corresponde al TC de un turborreactor. Para evitar la formación de ondas de choque la velocidad W_1 no debe exceder el valor indicado por la relación de la ecuación 28.

Ecuación 28. Relación indicada de número de Mach empleada en los TC.

$$M_a = W_1/a_1 \leq 0,85 \text{ a } 0,9$$

4.1.8 Anchos a la entrada y salida b_1 y b_2

Considerando el de entrada radial, en virtud de la ecuación de continuidad se tendrá:

$$\tau_1 b_1 d_1 \pi c_{1m} = Q_1 + q$$

Donde: Q_1 es el caudal en volumen a la entrada del escalonamiento

q Es el caudal intersticial

De donde:

Ecuación 29

$$b_1 = \frac{Q_1}{u_v} \frac{1}{\pi d_1 c_{1m} \tau_1}$$

Donde: $n_v = Q / (Q + q)$ es el rendimiento volumétrico que al llegar a este lugar deberá estimarse. A causa de las perdidas intersticiales el caudal que bombea el compresor suele ser 1,5 a 2,5% más elevado que el caudal útil.

Análogamente el ancho a la salida:

Ecuación 30.

$$b_2 = \frac{Q_2}{n_v} \frac{1}{\pi d_2 c_{2m} \tau_2}$$

En las ecuaciones 29 y 30, τ_1 y τ_2 son los coeficientes de obstrucción a la entrada y a la salida de los álabes, ambos menores que 1 y deberán estimarse por parte del diseñador [1].

4.1.9 Diámetro del eje d_e , diámetro del cubo d_c y diámetro de la boca del rodete d_a

El diámetro del eje se calcula según la resistencia de material teniendo en cuenta el material y el momento de torsión máximo admisible. El momento de torsión máximo del eje puede estimarse para los aceros de uso corriente en su construcción de 23 a 17 N/mm² (los valores menores para los TC de 1 solo escalonamiento de pequeña longitud y rotores de poco peso).

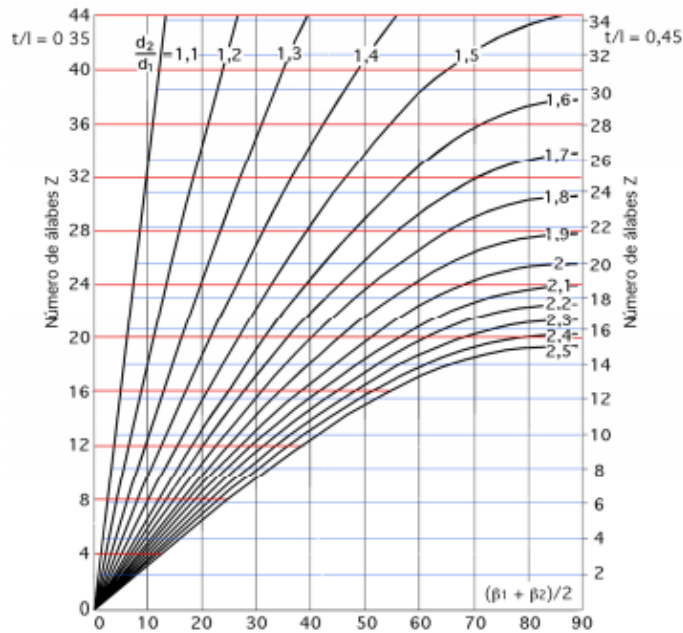
La frecuencia natural del rotor y los numero críticos de revoluciones determinan las velocidades. El rodete deberá funcionar por debajo de la primera velocidad critica o entre esta y la segunda. Lo ordinario es proyectarlo para funcionamiento por debajo de la primera velocidad crítica. Sobre todo si el compresor ha de funcionar temporalmente con velocidad más baja de la normal.

El diámetro del cubo en los compresores radiales suele hacerse algo mayor (de 25 a 50mm) que el diámetro del eje. El diámetro de la boca del rodete se hace ligeramente menor que el diámetro de entrada en el rodete, con objetivo de conseguir una entrada suave.

4.1.10 Número y trazado de los álabes

El número de álabes del rodete está íntimamente relacionado por una parte con el rendimiento, y por otra con la altura teórica que puede conseguir con una geometría y un tamaño de rodete determinado. En cuanto a lo primero, al aumentar el número de álabes aumenta el rozamiento de superficie porque aumenta la superficie mojada; pero simultáneamente disminuye el rozamiento de forma porque la corriente va mejor guiada. El número de álabes óptimos será el que reduzca a un número mínimo la suma de estos dos tipos de pérdidas. La ilustración 26 representa el número óptimo de álabes de un compresor radial en función de los ángulos medio $\beta_1 + \beta_2/2$ y la relación de diámetros d_2/d_1 . Esta figura puede servir para seleccionar dicho número óptimo.

Ilustración 26. Numero de alabes Z de un TC radial en función del Angulo medio de álabes



Fuente: www.pfernandez/compresores.com

También puede llegarse a una estimación del número óptimo de álabes por la siguiente fórmula propuesta por Stepanoff [5], que da buenos resultados para una gran gama de velocidades específicas:

$$\frac{l}{t} = 2,38 \psi$$

Donde: ψ es el coeficiente de presión.

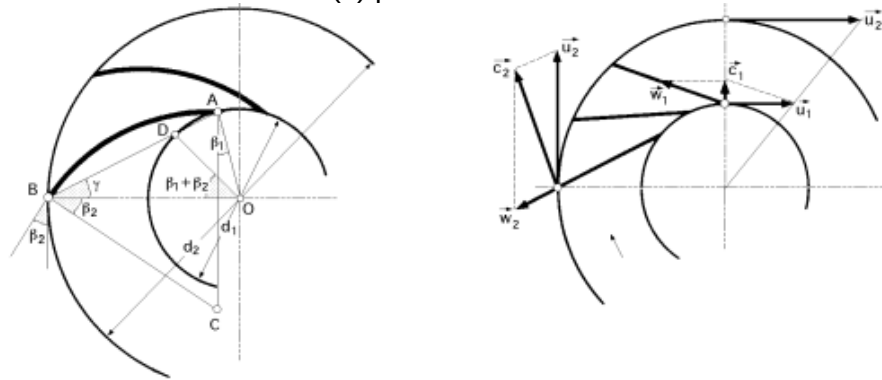
l Es la longitud desarrollada del álabe.

t Es $\pi d_2/2$ paso del álabe.

El flujo del número de alavés es el salto periférico Y_a se manifiesta en el factor de deslizamiento (ver sección 7.6).

Para el trazado del álabe se han determinado hasta el momento solamente los ángulos β_1 y β_2 . En un fluido ideal sin viscosidad la forma misma del álabe sería indiferente. En un fluido real es preciso buscar la curvatura del álabe más favorable que reduzca las pérdidas a un mínimo. Por su sencillez de cálculo y construcción en los TC de bajo costo se emplea el álabe de un solo arco de circunferencia. Para hacer este trazado basta con determinar el centro C de una circunferencia que corte a las circunferencias de diámetros d_1 y d_2 respectivamente bajo los ángulos β_1 y β_2 . [1]

Ilustración 27. Trazado del álabe de un TC radial constituido por, (a) por un arco de círculo (b) por una recta.



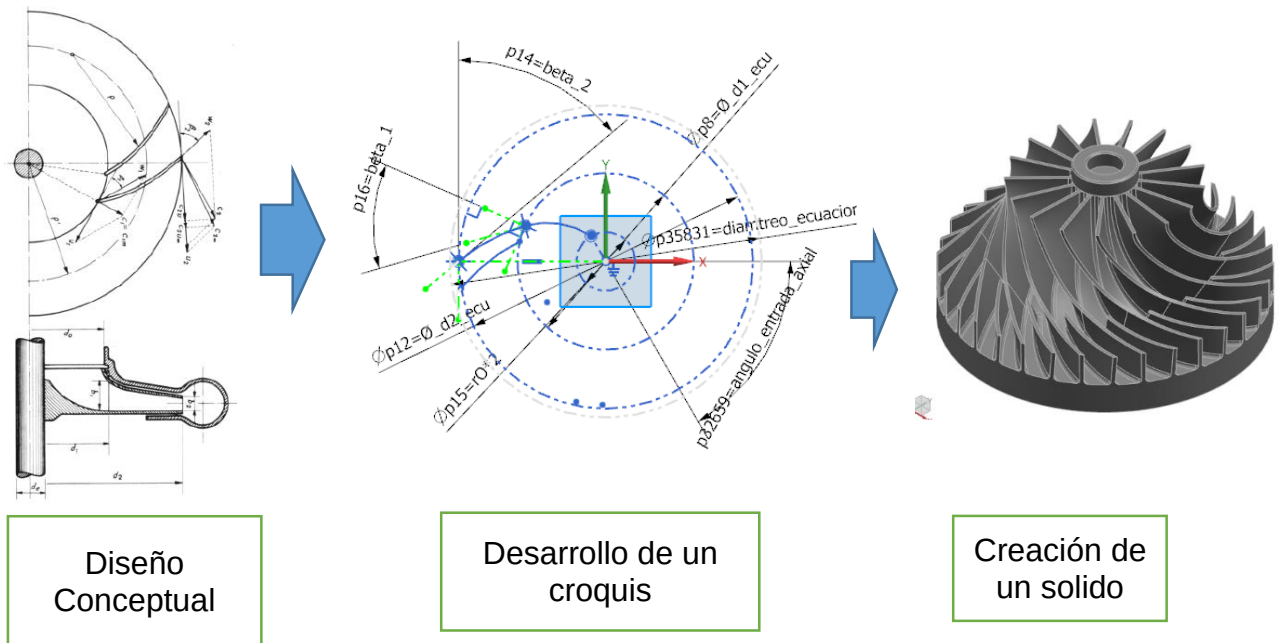
Fuente: www.pfernandez/compresores.com

La construcción se afecta como en la lustración 27, de la manera siguiente: en un punto cualquiera **B** de la circunferencia d_2 se construye el ángulo β_2 . El centro del arco buscado se encuentra en la recta **BC**. A continuación se traza el radio **BO**. A partir de él se construye. Como se indica en la figura un ángulo $\beta_1 + \beta_2$. Se traza la recta **BD** que se prolonga hasta **A**. en el punto **A** se construye el ángulo β_1 , como se indica en la ilustración el punto **C** en que se cortan las rectas **BC** y **AC** es el centro del arco de circunferencia. Que constituye el álabe, y **BC=CA** su radio. Para demostrar basta ver que los ángulos en **B** y en **A** del triángulo **CBA** son iguales (por tanto **CB=CA=radio**) en efecto los ángulos 1 y 2[1].

4.2 Diseño CAD paramétrico

El diseño paramétrico es usado para controlar una geometría donde se pueden manipular parámetros dimensionales y geométricos, las cuales pueden ser usados en modelos 2D y 3D, en el modelo 2D es parametrizado el croquis de una geometría en el cual hay restricciones dimensionales como los son ancho, alturas, radios, diámetros, etc. Dentro del croquis se pueden usar restricciones geométricas las cuales permiten colocar características como simetría, igualdad de distancias, paralelismo, perpendicularidad, tangencia, concentricidad, etc. operaciones 3D como lo son las extrusiones, revoluciones, redondeos, patrones, etc. El uso de las parametrizaciones permite la creación de restricciones dimensionales y la imposición de restricciones geométricas la cual permite crear diferentes tipos de piezas según un diseño conceptual previamente estudiado antes de pasar al dibujo geométrico, los pasos para la generación de un modelo CAD parametrizado se ven en la siguiente imagen.

Ilustración 28. Diseño paramétrico



En la imagen se pueden apreciar las fases del diseño paramétrico las cuales abarcan los siguientes temas.

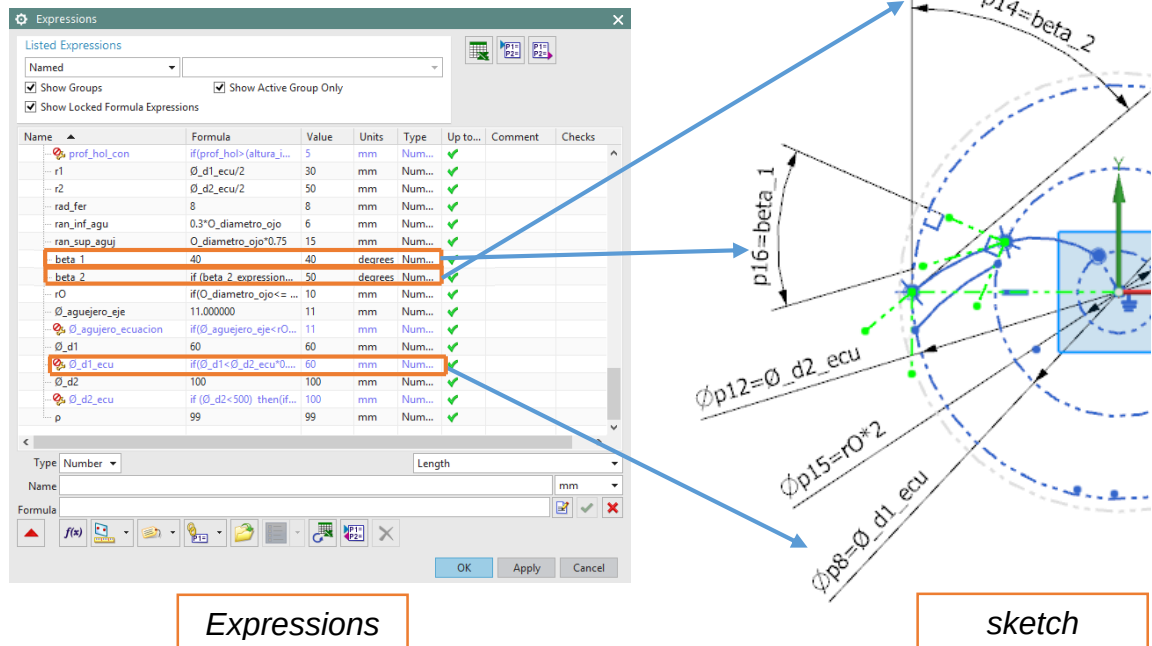
1. **Diseño conceptual:** Establecer los requerimientos conceptuales de la pieza como lo son el diseño mecánico, funciones, dimensiones de la pieza, modelo matemático, requerimientos de diseño, requerimientos de manufactura.
2. **Desarrollo del croquis:** a partir del diseño conceptual se analiza la geometría de la pieza, y se crea el croquis de la pieza donde se crean las restricciones dimensionales y se asignan las restricciones geométricas
3. **Crear un sólido:** con un croquis establecido se usa una operación para crear la pieza 3D la cual puede ser una extrusión o revolución, estas operaciones también pueden estar parametrizadas en cuanto ángulo de revolución y longitud de extrusión.

En los software existen diferentes forma de diseñar el producto mediante programa asociativos y paramétricos(uso de ecuaciones o condicionales), para realizar una parametrización se busca crear un trabajo más eficiente reusando las operaciones con la que se desarrolla una pieza o un ensamble de esta manera un producto puede ser modificado y manipulado por el usuario, cambiando las características iniciales sin necesidad de crear una nueva pieza, esto ahorra muchos tiempos permitiéndonos ser más eficientes, un diseño paramétrico permite crear un producto al que se le pueden realizar diferentes análisis variando su geometría ya se CAD (análisis de ensamblabilidad, requerimientos de diseño), CAM(análisis de manufacturabilidad según la tecnología disponible), CAE (resistencias de materiales, aerodinámica, transferencia de calor, etc.), con la herramienta paramétrica se podrán realizar varios rediseños permitiendo tener diferentes conclusiones para llegar a un producto final justificado según los análisis realizados.

4.2.1 Parametrización en SIEMENS NX

El software de Siemens cuenta con diferentes herramientas para diseño paramétrico básico como lo son las geométricas y dimensionales pero cuenta con la herramienta PTS (*Product Template Studio*) la cual permite crear una interface ordenada de parámetros dimensionales como también permite crear grupos con asignaciones booleanas para eliminar operaciones. NX tiene 2 formas de ordenar la parametrización ya sea dentro del croquis (*Sketch*) u ordenando todo dentro de la herramienta *expressions* en la cual se puede ordenar las fórmulas de manera ordenada como también tiene ayudas que nos permiten de una forma más ordenada asignar condicionales simples o anidados, dentro de esta herramienta también se pueden asignar datos booleanos, vectores, puntos, constantes, etc. En la siguiente imagen se puede apreciar el uso de las *expresions* y asignación en el croquis

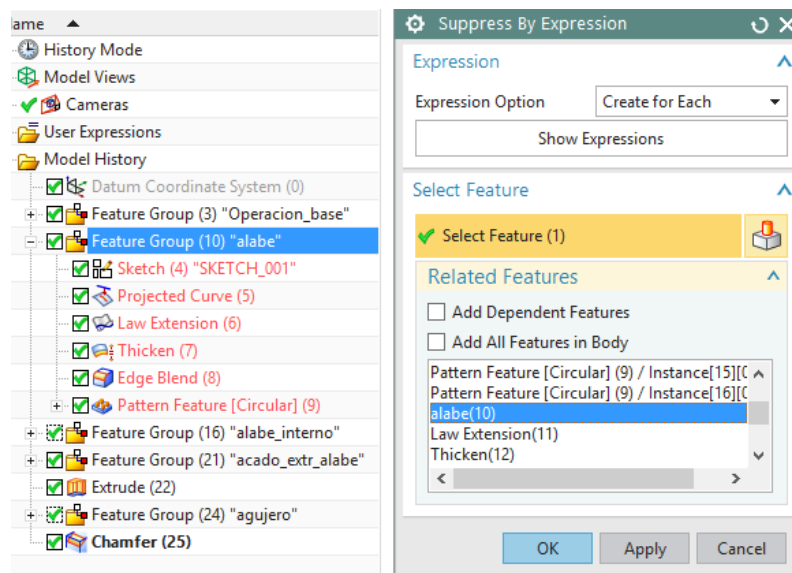
Ilustración 29 Uso de *expressions*



Fuente: autor

Por medio de las *expression* también se puede generar parametrizaciones de los sólidos en las cuales se pueden asignar alturas o ángulos de revolución también se puede generar booleanos para eliminar una operación o grupos de operaciones que pueden contener operaciones 2D o 3D en la siguiente imagen se ven estas opciones

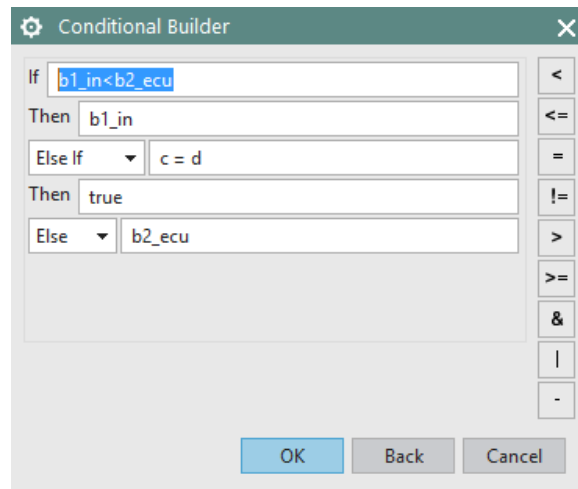
Ilustración 30 eliminar con una *expression* booleana



Fuente: autor

Para crear un modelo paramétrico total mente restringido se puede usar la ayuda de los condicionales los cuales no permitirán manejar limites que son establecidos por los requerimientos de diseño en el caso de un impeller los ángulos de entrada pueden ser de 30°, 40°, 50°, 70° los cuales pueden ser limitados para que solo se usen estos por el usuario, en la imagen se puede apreciar la ayuda de la herramienta expresión para usar condicionales anidados (los condicionales también pueden ser programados sin la necesidad de usar esta ayuda)

Ilustración 31 gestor para creación de condicionales

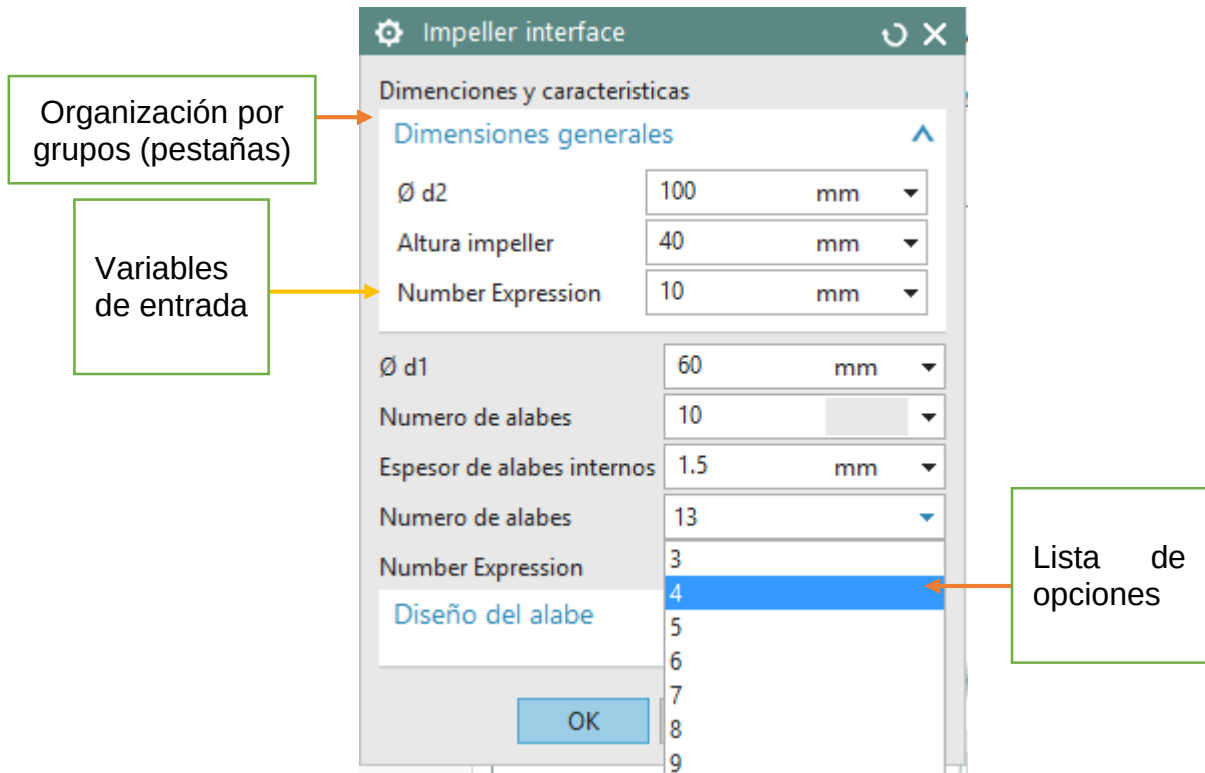


Fuente: Autor

Dentro de la herramienta se pueden generar diferentes estrategias para realizar una pieza final paramétrica dentro de la herramienta *expression* también se pueden realizar diferentes operaciones matemáticas con las cuales su resultado puede ser usado para calcular masas y volúmenes o también para obtener magnitudes para el dimensionamiento de croquis.

Un producto paramétrico ya puede ser realizado con las operaciones y herramientas mencionadas, logrando crear con el mismo programa diferentes piezas al variar los parámetros y cambiar sus geometrías, el problema de usar solo *expressions* puede ser desordenado ya que las ecuaciones, boléanos y condicionales están en una misma tabla por lo cual si otra persona diferente al programador manipula el programa no va lograr ubicar los datos de entrada fácilmente. Para solucionar esto Nx ofrece el PTS (*Product template studio*) con el cual el programador podrá crear una interface con el cual los datos de entrada quedaran ordenados para que el usuario pueda manipularlas según los requerimientos del cliente, la aplicación PTS permite de igual manera parametrizar las expresiones colocando limites por medio de tablas o barras deslizantes en la siguiente imagen se ve una interface.

Ilustración 32 interface creada en el PTS

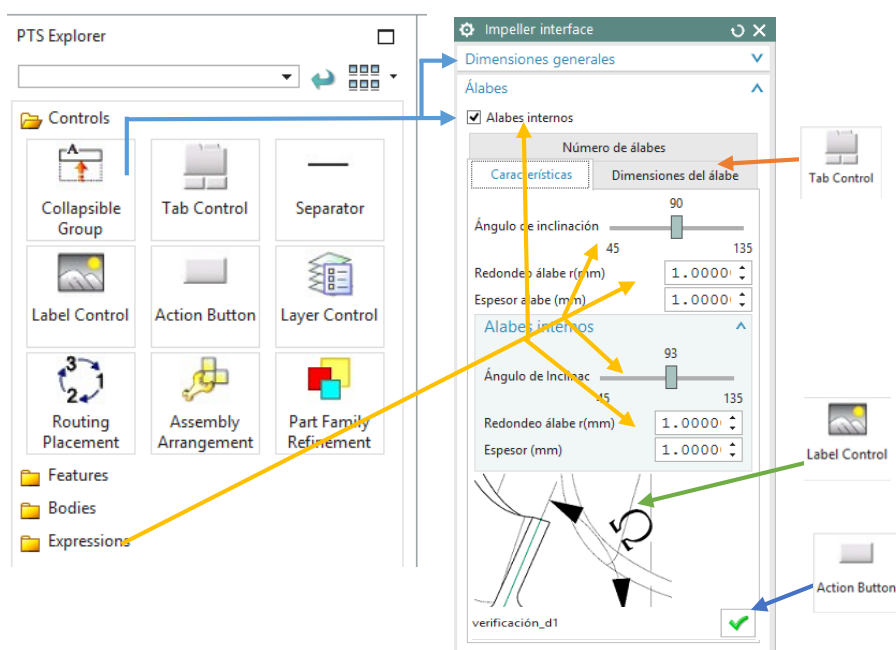


Fuente: Autor

Estas herramientas son de gran ayuda ya que la iteración con el usuario será más agradable, con la interface el usuario no tendrá que manipular los bocetos u operaciones 3D solo tendrá que modificar los campos que serán los datos de entradas para cambiar el diseño del modelo.

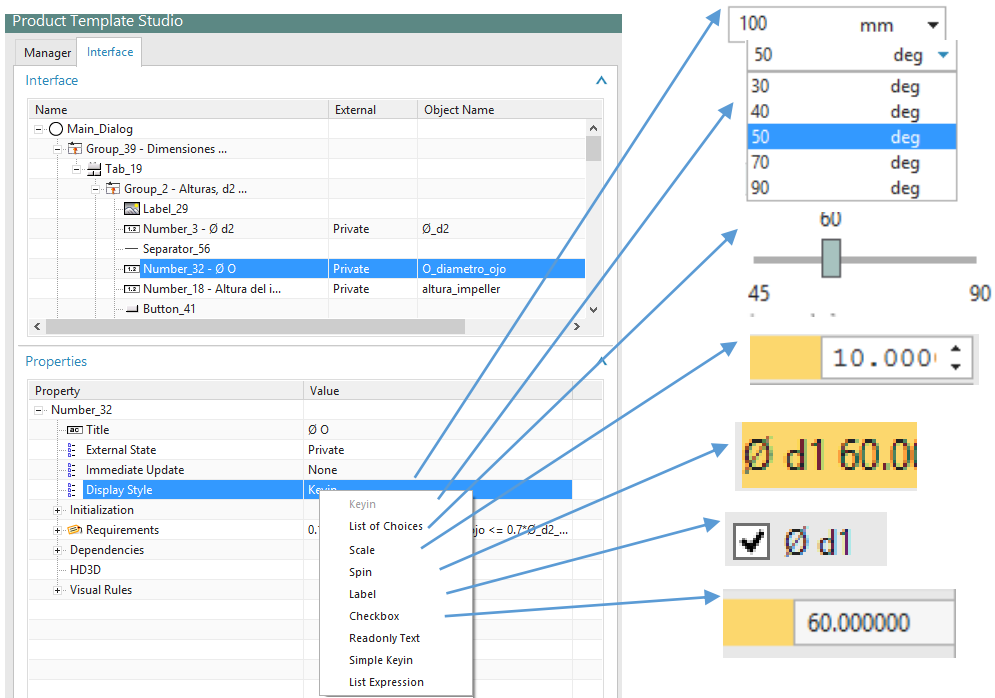
El software NX brinda diferentes opciones para la programación de estas interfaces, el editor del PTS nos permite ordenar por medio de pestañas, grupos colapsibles, líneas separadoras, imágenes, botones de acción y control de capas. Con estas herramientas el usuario crea grupos en los cuales se ordenan las *expressions* que serían los datos de entrada en la interface, la función de la interface es variar las *expressions* según el elemento de control para que esta modifique la geometría de la pieza paramétrica, en las siguientes imágenes se ilustran una interface con los distintos elementos de control del dato de entrada

Ilustración 33 herramientas de la interface



Fuente: Autor

Ilustración 34 diseño de la interface



Fuente: Autor

En la ilustración 34 se pueden observar los diferentes métodos para la manipulación de los datos de entrada cada una de estas modificaran los croquis u operaciones 3D, a continuación, se describe el funcionamiento de cada uno de los estilos,

Keyin: esta herramienta permite el ingreso de una magnitud en pantalla, el cual no está restringido, pero con los botones se pueden crear anuncios para que el usuario sea alertado si está dentro de los rangos establecidos en las *expressions*, en caso de que no esté en los rangos si se creó una ecuación condicional para no permitir pasar del rango el programa establecerá la medida máxima o mínima según sea el caso, si esto no es asignado el programa se puede dañar ya que podría tomar valores muy alto o muy bajos

List of choice: permite crear listas interactivas las cuales el usuario puede seleccionar, la lista variara de 0, 1, 2, 3, 4,...N. la expresión seleccionada por lo cual siempre va ligada a otra para establecer valores de modificación en el boceto por ejemplo si es =0 entonces tome el valor de 5 si no es igual a 10 (if (x=0) then (y=5) else (y=10)).

Scale: permite la manipulación de una barra deslizante la cual permite controlar el dato de entrada manejando rangos que pueden estar parametrizados o establecerlos como valores fijos como se ve en la imagen.

Ilustración 35 rangos estilo Scale

Display Style	Scale		
☒ Minimum value	45	☒ Minimum value	$rO^2 \cdot 0.1$
☒ Maximum value	135	☒ Maximum value	$rO^2 \cdot 0.85$
☒ Increment	1	☒ Increment	1
☒ Decimal Places	0		

Fuente : autor

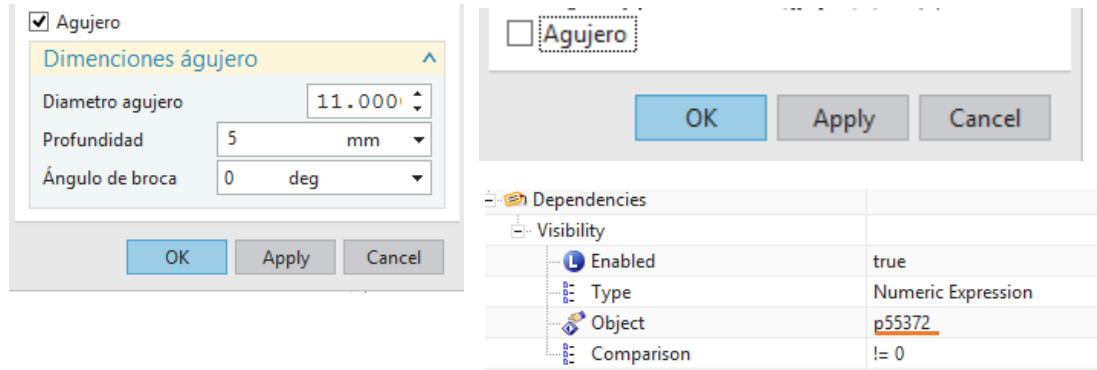
Spin: esta herramienta permite el ingreso del valor en pantalla por parte del usuario pero si sele del rango el sistema por default asignan el valor mayor o menor según sea el caso, esta herramienta es parecida al estilo *scale* ya que los valores mínimos y máximos se pueden designar como constantes o variables a partir de una ecuación o condicional

Check box: esta opción se usa para valores booleanos 0 o 1 con los cuales son usados para eliminar o añadir una operación 2D o 3D o un grupo que contenga diferentes procedimientos CAD

Label & Readonly tex: estas son herramientas las cuales muestran un valor en pantalla la cual no puede ser modificada pero puede ser usada para observar el resultado de operaciones matemáticas, constantes y rangos

Para la parametrización también se pueden ocultar o hacer visibles una pestaña la cual contenga diferentes operaciones esto permite que si una operación es eliminada no exista la posibilidad de editarla, pero si se añade una operación la cual tenga elementos variables se deben permitir modificar, esto se puede realizar por medio de condicionales asignados en la opción de dependencia como se ve en la siguiente imagen.

Ilustración 36 Dependencia de un grupo visible



Fuente: autor

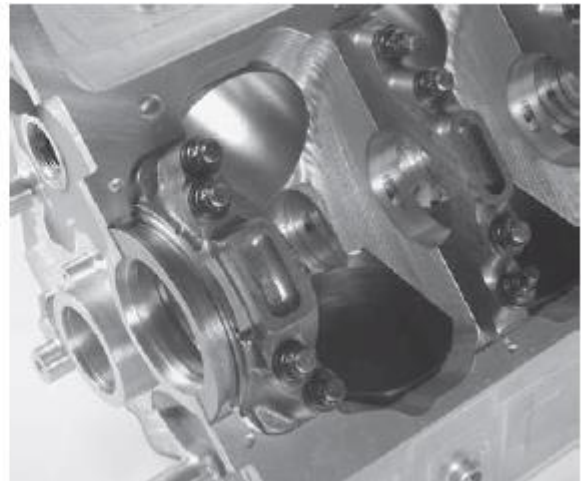
La aplicación PTS author contiene muchas herramientas que permiten realizar diferentes modificaciones por parte del usuario, pero en esta sección se presentaron las principales características que van a ser usadas para el desarrollo CAD del impeller.

4.3 Operaciones de mecanizado multieje

En las maquinas herramientas comúnmente conocidas para la fabricación de distintos tipos de piezas y productos se utilizan diferentes tipos de operación para poder realizar, el proceso de manufactura tales operaciones (refrentado, cilindrado, roscado, rectificado, fresado, etc.) solo requieren de 2 a 3 ejes de mecanizado por lo cual para hacer piezas complejas se requiere la habilidad de un operador o de una tecnología más avanzada; Dentro del proceso de manufactura por arranque de viruta más específicamente dentro de las tecnologías de centros de mecanizado controlado por computador se puede fabricar piezas de mayor complejidad y precisión debido a que estas tecnologías ofrecen una mayor flexibilidad y versatilidad que les falta a otras máquinas herramientas individuales.

Cuando se describe los procesos individuales de maquinado y las maquinas herramientas se concluye que cada máquina sin importar su grado de automatización está diseñada para realizar el mismo tipo de operación, esto es un problema porque algunas piezas requieren operaciones adicionales en algunas partes de su geometría para ser terminada. Por ejemplo en la ilustración estas piezas tienen varias características geométricas complejas y estas requieren diferentes tipos de operaciones de maquinado para cumplir con los requisitos específicos para la que fue diseñada como puede ser la forma, tolerancias dimensionales y acabado superficial.

Ilustración 37. Diferentes tipos de piezas con geometrías complejas que requieren diferentes tipos de mecanizado.



Fuente: S. Kalpakjian, Manufactura, ingeniería y tecnología

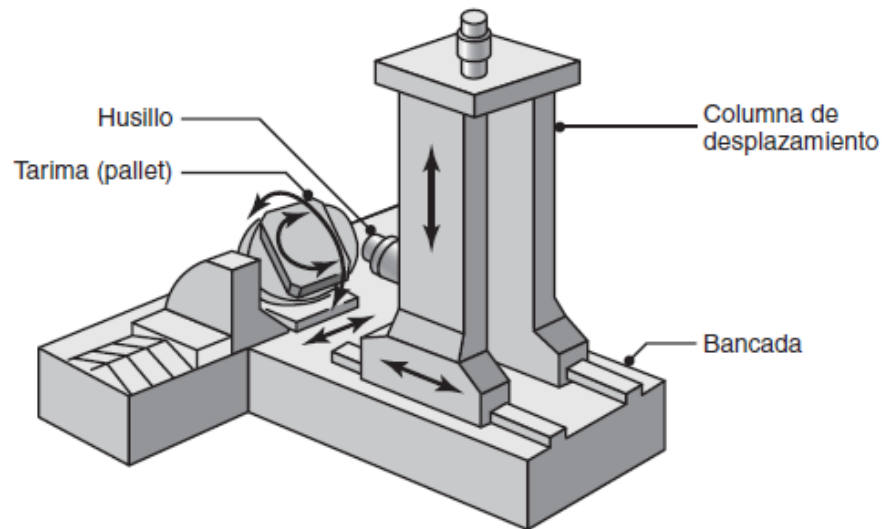
Algunas de las conclusiones que llegaron a los ingenieros a diseñar y emplear centros de mecanizado para operaciones multieje son:

- Existen algunas posibilidades en la producción de forma neta o forma casi neta de estas partes, dependiendo de los requisitos específicos para las formas, tolerancias dimensionales, acabados superficiales, diversas propiedades mecánicas y otras que podrían satisfacer los requisitos de servicio. Los procesos de forma que son candidatos para estas partes son la fundición de presión, la metalurgia de polvos, el modelo por inyección de polvos y el forjado de precisión. Sin embargo, aun así es muy probable que las partes sigan requiriendo operaciones de acabado adicionales. Por ejemplo, necesitaran maquinado posterior los orificios profundos de diámetro pequeño, los orificios roscados, las superficies planas para ser selladas con empaques, las tolerancias dimensionales muy cerradas, las esquinas y los bordes agudos, así como las superficies planas o curvadas diferentes requerimientos de acabado superficial[6].
- Si se requiere cierta forma de maquinado o se demuestra que es más económico dar acabado a estas partes mediante maquinado para proporcionales su forma final, entonces es obvio que ninguna de las maquinas herramientas comunes pueden producir estas partes por completo. También observamos que, tradicionalmente, las operaciones de maquinado se efectúan pasando la pieza de trabajo de una máquina herramienta a otra hasta completar todas las operaciones de este proceso[6].

Como se puede ver en el anterior párrafo las razones para utilizar los centros de mecanizado por su flexibilidad para realizar piezas de compleja geometría o con altos estándares en calidad; estos centros de mecanizado son una gran ventaja porque pueden trabajar hasta con 5 ejes de movimiento en consecuencia, se puede realizar un sinfín de piezas con altos estándares de calidad. Los centros de maquinado es una máquina herramienta que es controlada por computador y esta puede realizar varias operaciones de maquinado en diferentes superficies y orientaciones de una pieza de trabajo sin tener que ser retirada del dispositivo de sujeción. Por lo general, la pieza de trabajo esta estática durante el proceso de mecanizado y son las herramientas de corte las que realizan las operaciones de corte. Como se puede ver en la siguiente ilustración, la herramienta por medio de los diferentes ejes de movimiento puede realizar varias operaciones sin la necesidad de desmontar la pieza de trabajo. Es esta podemos encontrar diferentes pates como lo son: el *pallet*⁶, el modulo. Como se puede ver este centro de mecanizado además de los 3 ejes de movimientos comunes cuenta con el modulo en la que va el *pallet* esta tiene la característica que puede girar alrededor de 2 ejes, lo que permite un maquinado complejo.

⁶ Lugar en el centro de mecanizado donde se posicional el material de trabajo o material en bruto.

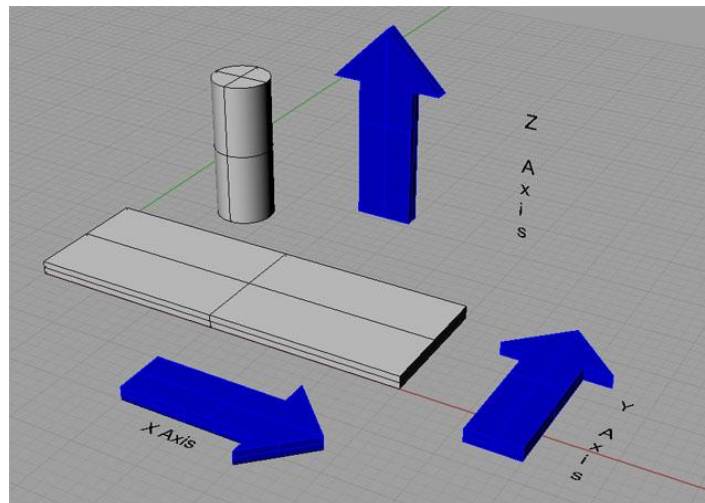
Ilustración 38. Partes de un centro de mecanizado de 5 ejes



Fuente: S. Kalpakjian, Manufactura, ingeniería y tecnología

El centro de mecanizado como principio básico de movimiento utiliza 3 ejes de movimiento que son el eje X, Y, Z es sencillo representarlo este sistema coordenado solo con la mano derecha con el dedo medio extendido y el pulgar hacia arriba y el dedo índice formado un Angulo recto, estos 3 dedos están apuntando en las direcciones de X positivo (medio), Y (índice). Z (pulgar). Esto quiere decir que un CNC utiliza un sistema diestro de coordenadas.

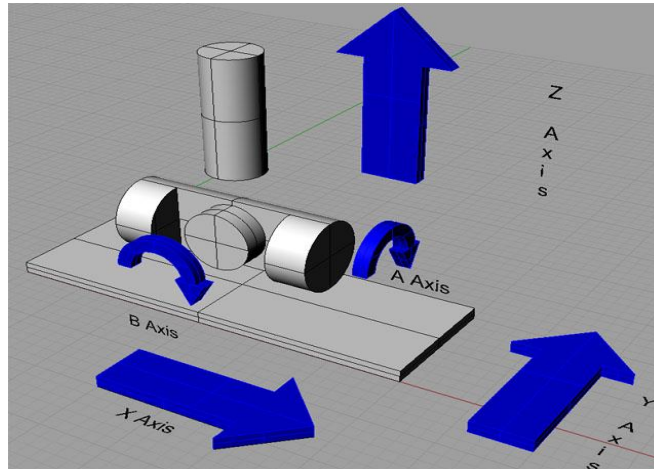
Ilustración 39. Sistema coordenado diestro en un CNC



Fuente: www.cnccookbook.com

En un centro de mecanizado de 4, 5 ejes y más, su configuración varía según el tipo de CNC pero con esto se logra la producción de piezas más complejas, en la siguiente ilustración se ve los ejes de rotación en un CNC de 5 ejes. Cuando se añade los dos ejes de rotación con el diagrama básico de la máquina para proporcionar un eje-A y un eje-B; en general A, B, C son ejes de rotación que giran alrededor de ejes formados por X, Y, Z respectivamente.

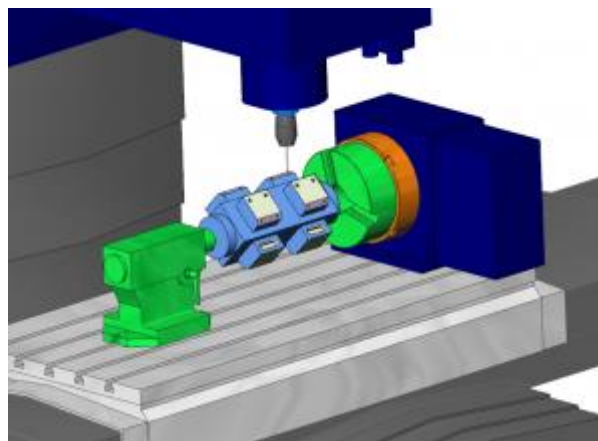
Ilustración 40. Sistema coordinado en un CNC de 5 ejes de movimiento



Fuente: www.cnccookbook.com

El Uso de Software CAD-CAM para el proceso de manufactura en múltiple ejes da una ventaja para la manufactura de geometría compleja que requiere rotación o indexación. Tener un sistema CAM es crucial para desbloquear completamente los 4 y 5 ejes para poder programar rápidamente los programas para piezas de gran complejidad.

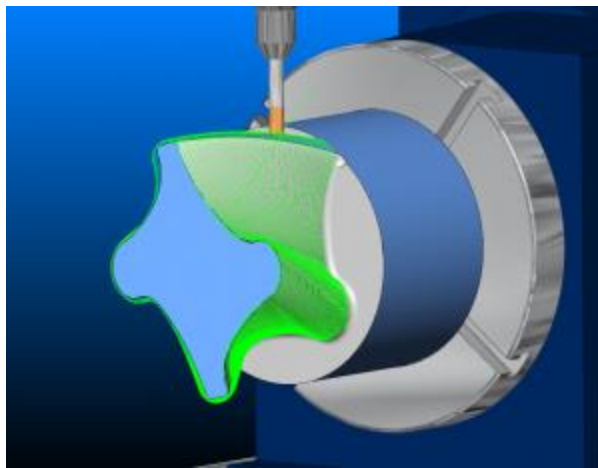
Ilustración 41. Indexación de 4 eje en una maquina CNC



Fuente: bobcad.com

Como se muestra en la ilustración 41; la indexación es donde se gira la piza de trabajo alrededor de su cuarto eje. El ángulo de rotación del cuarto eje es llamado “índice” debido a que está sujeta el cuarto eje tiene 360 grados de rotación, esta característica le permite cambiar la orientación de la pieza a voluntad, el empleo del cuarto eje da la capacidad de acceder a partes de la piza de trabajo que no se pueden acceder de con maquinado común. En consecuencia, en lugar de tener que reacomodar la pieza de trabajo el operador tiene la posibilidad de indexar la pieza y continuar con el maquinado lo que le permite al CNC tener 2 o más frentes de trabajo.

Ilustración 42. Maquinado en 4 ejes haciendo uso de la indexación.

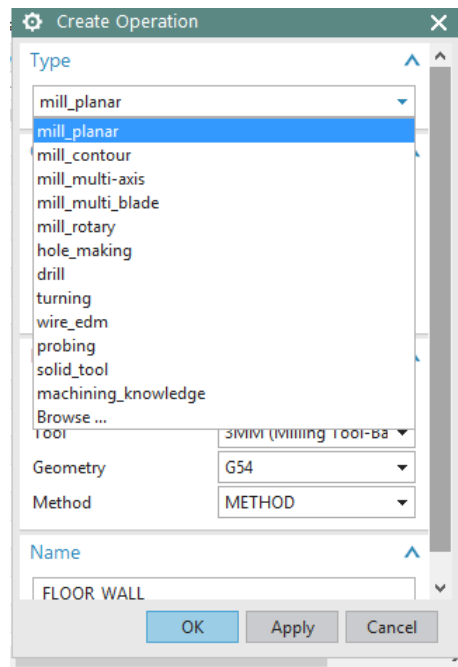


Fuente: bobcad.com

4.3.1 Operaciones multieje en los software CAD/CAM

Para poder realizar un mecanizado multieje en un CNC es necesario contar con un software CAM que tenga dentro de sus opciones operaciones multieje y simuladores de los ejes A Y B que son fundamentales para poder realizar este tipo de operaciones; en cuanto a los tipos de operaciones multieje que existen pueden variar de la gran variedad de software CAD/CAM por lo que hay muchos tipos de operaciones. Sin embargo, en el caso particular la gran mayoría de estas operaciones multieje dependen de algunas variables importantes que varía según la pieza de trabajo, las herramientas disponibles y la capacidad tecnología de software y la máquina. En el software NX en el módulo CAM existen distintos tipos de opciones para trabajar con operaciones multieje y cada una tiene características diferentes para distintos tipos de geometrías.

Ilustración 43. Diferentes tipos de operaciones en NX



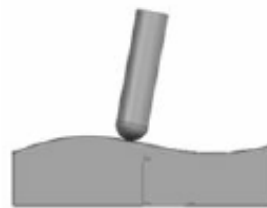
Fuente: Autor

En la anterior imagen se pudo ver los diferentes tipos de operaciones generales presentes en el software NX, cada una de estos módulos tienen operaciones particulares para diferentes usos por ejemplo el módulo “*mill_planar*” es específicamente para operaciones en 2 y 3 ejes como son operaciones de planeado, encajonado, fresado, y contornos sencillos. El siguiente módulo es “*mill_contour*” este tipo de operación maneja máximo los 3 ejes pero en casos específicos se puede usar el eje B para hacer indexación de cara este tipo de operación se llaman 3+1 o 3+2 debido a que emplean el eje A Y B para hacer una indexación o basculación pero solo para el posicionamiento de la pieza de trabajo, esto quiere decir que la operación no es completamente multieje por que en el momento de maquinar solo 3 ejes están en movimiento; este tipo de operación es especial para manejar superficies curvas como la de los moldes de inyección debido a que algunas de las operaciones pueden realizar acabados muy precisos.

En las operaciones que implican más de 3 ejes de movimiento, NX ofrece 3 tipos de operaciones específicas para CNC de 4 y 5 ejes, estas operaciones tienen características especiales de programación que sirven para distintos métodos de mecanizado pero que están basadas bajo un concepto similar presentes en las diferentes suboperaciones.

Dentro de las operaciones para el manejo de 4 y 5 ejes esta la opción de “*mil_multi-axis*” esta permite la opción de mecanizado simultaneo de todos los ejes disponibles en la máquina para poder realizar mecanizado de piezas complejas como turbinas, *impellers*, etc. Como ya se mencionó este tipo de geometrías se caracterizan por tener geometrías no constantes o de formas irregulares; esta operación tiene la propiedad de que el usuario puede seleccionar las áreas de la pieza de trabajo y el eje de inclinación de esta este principio es nombrado “*variable-axis surface contouring*” es una operación para cavado de áreas o superficies de contorno esto mediante la remoción de materia a lo largo de la geometría de trabajo, el eje de la herramienta cambia constantemente de orientación que se mueve a lo largo de la trayectoria de la herramienta.

Ilustración 44. Cambio del eje de la herramienta en operaciones multieje

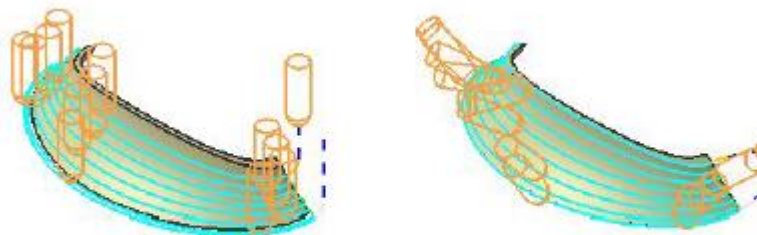


Variable tool axis

Fuente: NX

El eje de la herramienta define como un vector que sus puntos están entre la punta de la herramienta y hacia el soporte de la herramienta. Cuando se habla de un mecanizado 3 ejes el eje de la herramienta permanece paralelo a un vector especificado en cambio en una operación multieje el eje cambia de orientación ya que se mueve a lo largo de la trayectoria de la herramienta.

Ilustración 45. Eje de la herramienta según la trayectoria de esta.



Fixed-axis

Variable-axis

Fuente: NX

En NX el usuario tiene a opción de definir el eje de orientación de la herramienta si es de eje fijo o variable esto dependiendo el tipo de operación:

- *Fixed contour* permite la selección vectorial del eje de la herramienta al proporcionar opciones a los ejes que no son perpendiculares a la mesa de trabajo
- *Variable contour* permiten mucha diferentes opciones de d eje de herramienta.

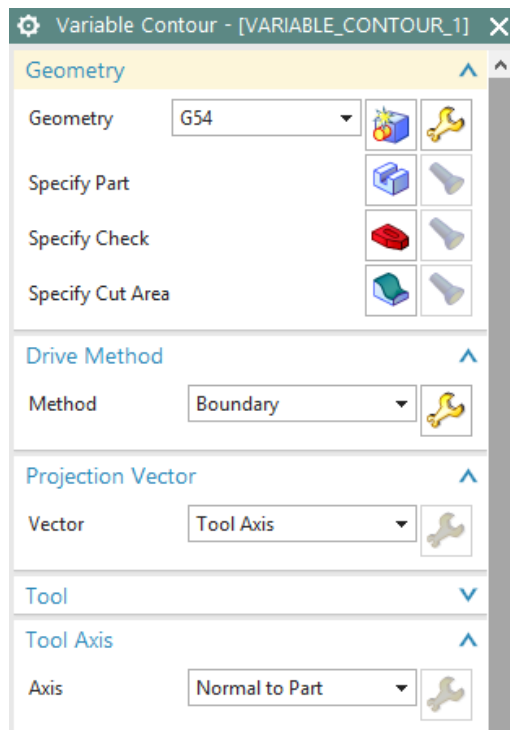
El eje de la herramienta en NX varía según el método de trayectoria que se selecciones, existen diferentes tipos de métodos como lo son:

- Uso de puntos, curvas o líneas
- Relativas a un vector o interpolación entre vectores
- Normal a la parte o a la trayectoria de la geometría
- Relativo a la parte o a la trayectoria de la geometría

Algunas opciones de eje de herramienta permiten añadir *lead*, *tilt*, lag y rotación.

Dentro de la opción “*mil_multi-axis*” y particularmente dentro de la operación “*variable contour*” podemos ver una interfaz con diferentes variables para poder realizar la operación multieje particular, en la ilustración 37 se puede ver las diferentes variables siendo las más importantes para desarrollar la operación: “*Driver Method*”, “*Projection vector*”, “*Tool Axis*”.

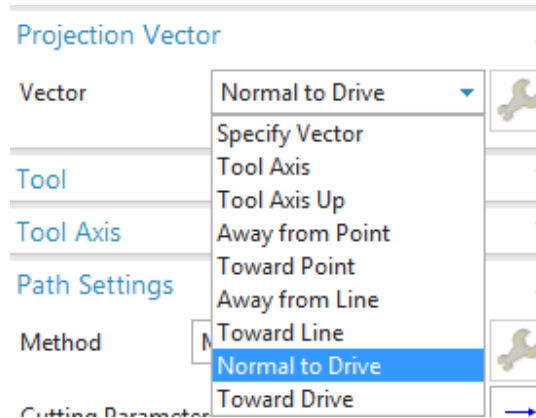
Ilustración 46. Interfaz de la operación “variable contour”



Fuente: Autor

La primera variable que el usuario debe seleccionar es “*Projection vector*”; es esta podemos ver una lista delegable con varias opciones como se puede ver en la ilustración 47, estos métodos son específicos para cierto tipo de geometría por lo tanto el usuario debe saber seleccionalos.

Ilustración 47. Diferentes métodos de proyección de vector

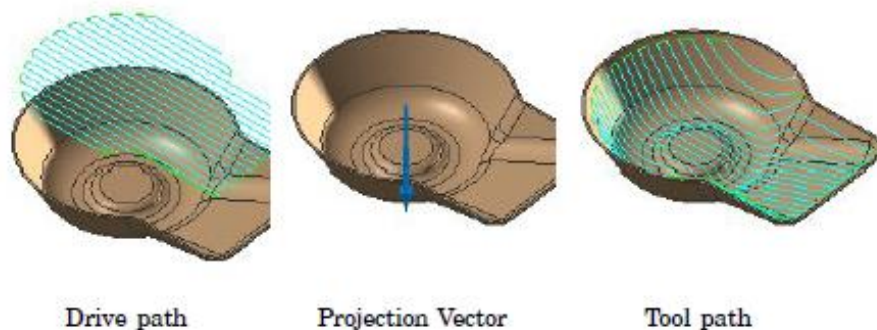


Fuente: Autor

La variable “*Projection Vector*” s usada para proyectar los puntos de trayectoria en la parte seleccionada de la geometría. El usuario tendrá que especificar lo siguiente:

- La dirección en la que los puntos de trayectoria se proyectan en la geometría de la piza.
 - El sitio de la geometría de la pieza en donde la herramienta tenga contacto.
- En la siguiente ilustración se emplea un vector de proyección fija.

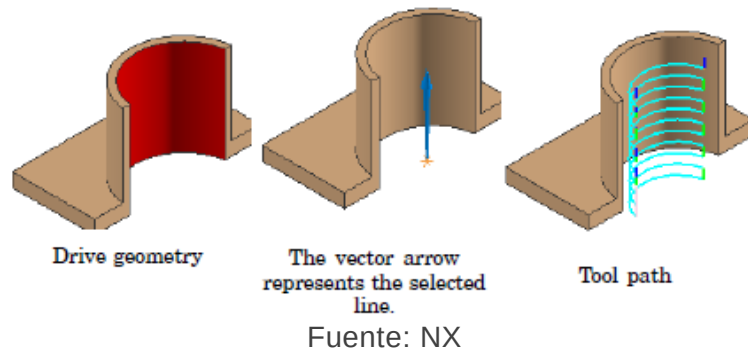
Ilustración 48. Método de proyección de vector



Fuente: NX

Esta otra ilustración muestra el método de vector de proyección variable, esta proyección no está sobre la geometría.

Ilustración 49 método de proyección variable

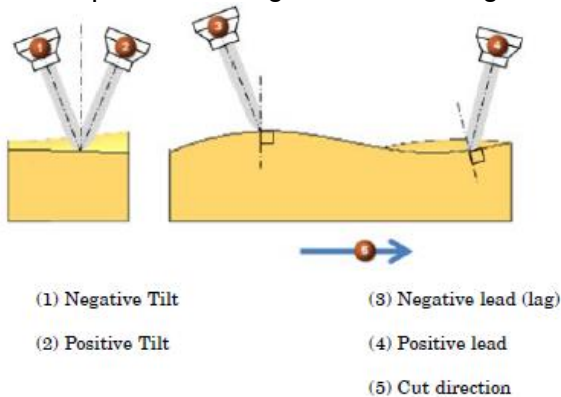


Los vectores de proyección que se encuentran disponibles se basan en el método de estrategia seleccionado. Los métodos de “Area Milling” y “Flow Cut” no utilizan este método.

Cuando se habla de una estrategia de mecanizado multieje es muy importante el eje de la herramienta, esta se define de varias formas dentro de las estrategias con las que cuenta NX; una de las variables de programación de estrategias son los ángulos *tilt* y *lead*, esto tiene la siguiente definición:

- *Lead angle* (ángulo de avance) define el ángulo en el que la herramienta se inclina hacia adelante o hacia atrás, como se mueve a lo largo de la trayectoria de la herramientas. Un valor positivo inclina la herramienta hacia delante en la dirección de la trayectoria de la herramienta, un valor negativo inclina la herramienta hacia atrás lejos de la dirección de la trayectoria de la herramienta.
- *Tilt angle* (ángulo de inclinación) define el ángulo en el que la herramienta se inclina de lado a lado. Un valor positivo inclina la herramienta a la derecha según se mire en la dirección inicial de corte, un calor negativo inclina la herramienta a la izquierda.

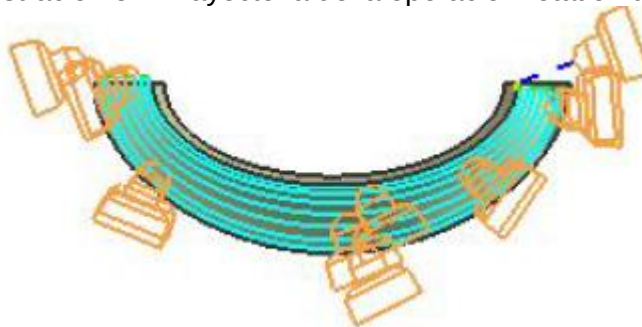
Ilustración 50. representación gráfica de los ángulos tilt y lead



Fuente: NX

Otra de las opciones que ofrece NX en sus operaciones multieje es la de *Rotation Angle* que permite a la herramienta girar alrededor de un eje de rotación definido mientras permanece perpendicular al eje de rotación. A diferencia del ángulo de avance (*lead angle*), la opción de *rotation angle* es independiente de la dirección de corte, la herramienta siempre se inclina al mismo lado de la superficie normal a la geometría a la vez en movimientos de zigzag. Esta opción permite girar con eficacia la parte alrededor de un eje como lo haría en una máquina herramienta con una sola mesa giratoria, la herramienta se mueve dentro de los planos que son normales al eje de rotación definido. En la siguiente ilustración se muestra la herramienta girar alrededor de un diferente eje normal de la herramienta.

Ilustración 51. Trayectoria de la operación rotation angle



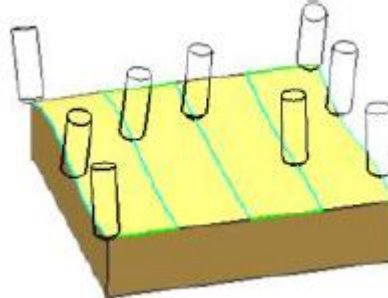
Fuente: NX

Otra de las opciones de selección de proyección de vector es "*normal tool axis*" esta opción mantiene el eje de la herramienta perpendicular a la geometría de la pieza, trayectoria geométrica o eje de rotación (4 eje) en cada punto de contacto. En NX esta opción está disponible:

- *Normal to Part, Normal to Drive*
- *4-axis Normal to Part, 4-axis Normal to Drive*

NX permite en el uso de 4 ejes definir un eje de rotación y aplicar un valor al ángulo de rotación.

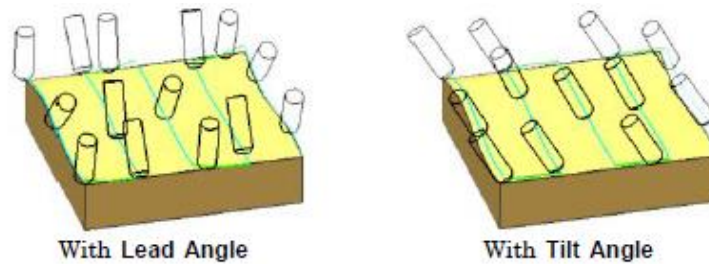
Ilustración 52. Movimiento de la herramienta con la opción *normal tool axis*



Fuente: NX

La opción *“Relative and dual tool axis”* mantienen el eje normal de la herramienta, también le permiten aplicar un valor principal de *lead* o *tilt* respecto al eje de la herramienta.

Ilustración 53. Forma de trabajo de los ángulos *lead* o *tilt*



Fuente: NX

En las siguientes opciones esta presentes la opción *“Relative tool axis”*:

- *Relative top Part, Relative to Vector, Relative to Drive*
- *4-axis Relative to Part, 4 axis Relative to Drive*

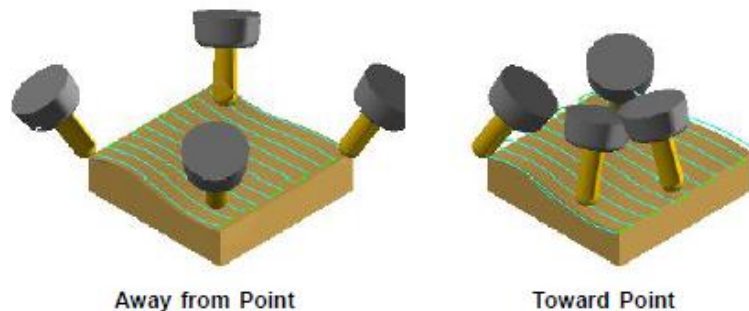
Las opciones de 4 ejes permiten definir un eje de rotación y aplicar un valor al ángulo de rotación.

La opción de “*Dual 4-axis*” son similares a las opciones de “*Relative tool axis*”. Sin embargo, el usuario puede definir los ángulos *lead* o *tilt* y el ángulo de rotación. De forma independiente para movimientos de zigzag, estas opciones están disponibles:

- *Dual 4-axis on Part*
- *Dual 4-axis on Drive*

Otra de las opciones que podemos ver en la ilustración 38 es la de “*point and line tool axis*”; esta opción de eje de herramienta emplea puntos focales o puntos de coordenadas sobre la superficie de trabajo, dependiendo el tipo de geometría esta opción produce movimientos en 5 ejes.

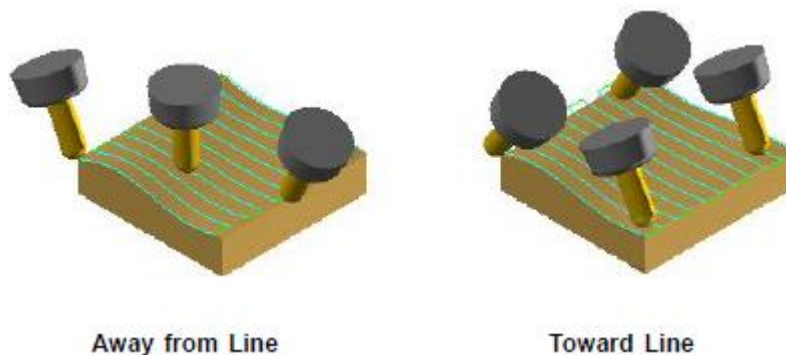
Ilustración 54. Movimiento de la herramienta con la opción de punto coordinar



Fuente: NX

La otra opción presente para modificar el eje de la herramienta emplea líneas focales, esta opción produce movimiento en 4 ejes simultáneos. (Nota: *Away* y *Towards* hace referencia a un vector de dirección)

Ilustración 55. Movimiento de la herramienta siguiendo una trayectoria de línea focal

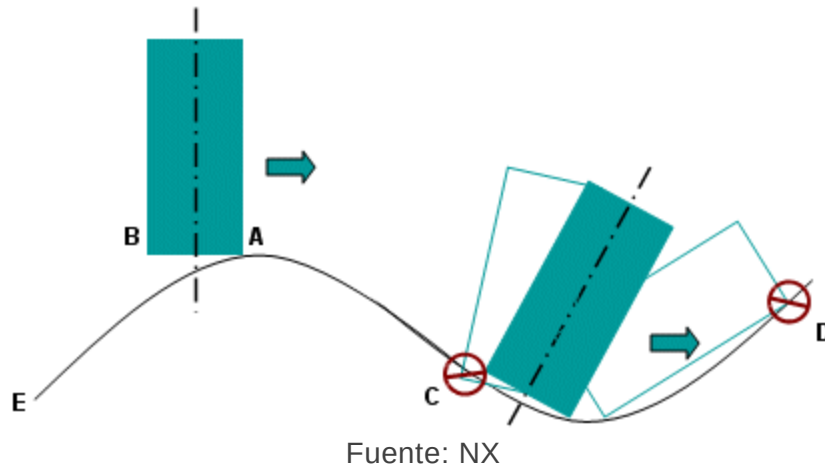


Fuente: NX

NX maneja un método de optimización de trayectoria, este método de control del eje de la herramienta correspondiente al ángulo *lead* de la curvatura geométrica de la trayectoria. En las zonas convexas, NX mantiene un pequeño ángulo *lead* para eliminar más material. En las regiones cóncavas, NX automáticamente aumenta el

ángulo *lead* para evitar que escalón de la herramienta haga contacto y cause un ranurado no deseado en la trayectoria de la geometría.

Ilustración 56. Angulo lead de la herramienta adaptado para coincidir con los requisitos de la geometría.



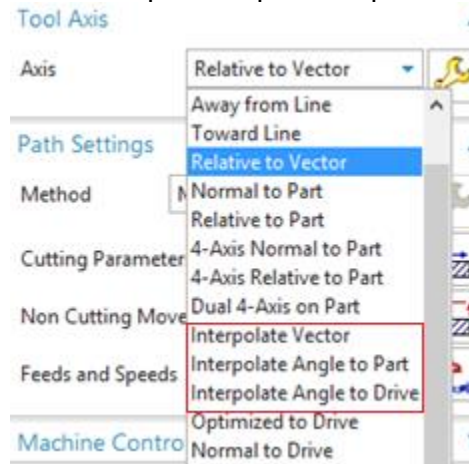
En la ilustración 56 aparecen varias variables sobre cómo funciona el método de optimización, estas son:

- A= % de herramienta que corta
- B= % de herramienta que no corta
- C= ranura causada por el talón de la herramienta
- D= escalón de la herramienta en contacto con la geometría
- E= trayectoria de la geometría

Para que la herramienta tenga un movimiento correcto NX mediante la optimización de trayectoria corrige automáticamente el ángulo de la herramienta como los ángulos *tilt* y *lead*. El usuario debe especificar el ángulo máximo *lead* permitido esto para evitar que un ángulo mayor cause cortes indeseados o rayones. Otro parámetro opcional modificable es el ángulo nominal *lead* sirve para especificar el ángulo *lead* preferido para optimizar las condiciones de corte para tener un óptimo corte de materiales manuales de usuario recomienda que el usuario permita al software optimizar los ángulos. La optimización de NX también trae valores por defecto como son el ángulo *tilt* que tiene un valor de 0 ó sea es fijo y la opción de pulido para acabados de mayor calidad. Si el usuario desea emplear este método de optimización de trayectoria trae los siguientes beneficios:

- Asegura que en la trayectoria de la herramienta no presentes rayones, cortes indeseados o zonas sin cortar
- Asegura la máxima remoción de material para reducir el tiempo de mecanizado
- Asegura que la herramienta solo corte en la punta para prolongar la vida de la herramienta.

Ilustración 57. Diferentes opciones para la opción “interpolate Vector”



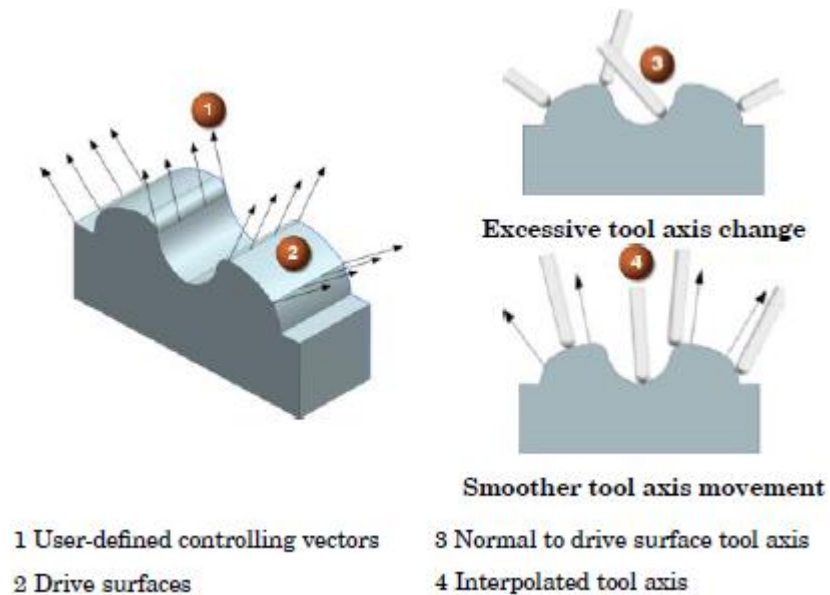
Fuente: Autor

Otra de las opciones disponibles para modificar el eje de la herramienta es la de “*interpolate Vector*” como se puede ver en la ilustración 48. Con esta se controla el eje de la herramienta en puntos específicos:

- Control de cambio excesivo del eje de la herramienta sin la necesidad de crear una nueva operación de control de eje.
- Ajustes del eje de la herramienta para evitar voladizos u otros obstáculos.

El usuario define los vectores que se extienden desde la posición especificadas en la trayectoria de la geometría. Para crear un movimiento para el eje de la herramienta que no tenga inconvenientes, el eje de la herramienta en cualquier punto de la trayectoria de la geometría se interpola por el vector especificado. Cuantos más vectores se especifican más es el control sobre el eje de la herramienta tiene el usuario, el usuario puede definir tantos vectores como sea necesario.

Ilustración 58. Movimiento de la herramienta con la opción “interpolate Vector”

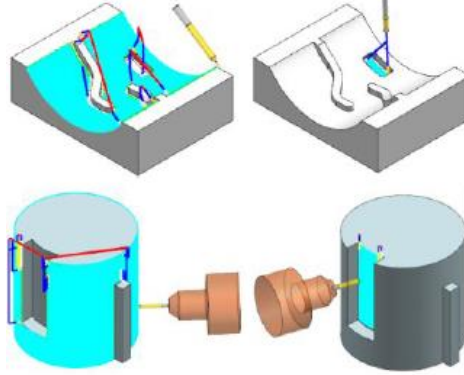


Fuente: NX

Continuando con las opciones multieje o de modificación del eje de la herramienta, NX tiene una opción especial para acabados de superficies cóncavas y circulares. Llamado “*Rotary Floor*” esta opción maneja 4 ejes en la trayectoria de la herramienta. Esta opción soporta diferentes configuraciones y variables como son:

- Herramientas redondas, esféricas, fresas con un diámetro de dos veces el radio de corte.
- Movimientos en zigzag
- Angulo lead variable.
- Inclinación del eje de la herramienta para evitar colisiones

Ilustración 59. Diferentes formas de mecanizado de la opción “Rotary Floor”



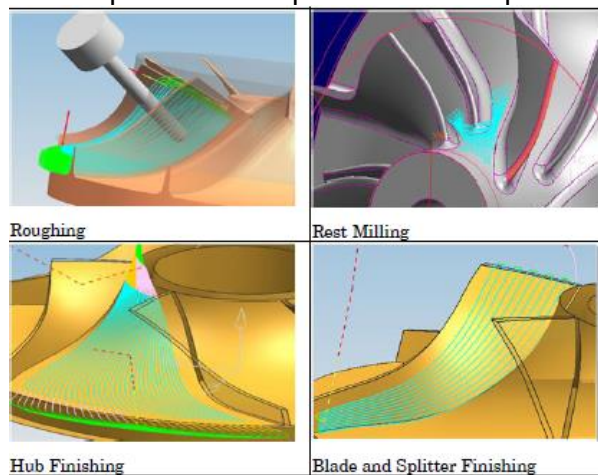
Fuente: NX

Módulos de manufactura para turbomaquinaria

NX ofrece un módulo especializado para el tallado de impellers, esta operación llamada “Multi Blade” es especial para tallado de álabes en impulsores o turbinas con o sin divisores. Esta opción de maquinado multieje está diseñada específicamente para el mecanizado de álabes de distintas geometrías; son operaciones más eficientes para el mecanizado de impeller debido a que en este módulo incluye la opción de operaciones de desbaste, acabado del cubo, acabado de álabes y acabado de divisores. Esta opción no tiene restricciones geométricas y la geometría seleccionada es compartida por todas las operaciones, el usuario puede especificar las siguientes geometrías:

- Múltiples divisores
- Álabes curvados y con redondeos
- Álabes con una o varias superficies

Ilustración 60. Operaciones específicas de la opción Multi Blade



Fuente: NX

4.3.2 CAM

A medida que avanzaba la tecnología en el manufactura multi-eje se hizo necesario un avance en los modelos computarizados de control de la máquina, estos debían tener la capacidad de poder realizar las operaciones de manufactura y simulación del proceso de maquinado. En la actualidad es necesario hacer la simulación CAD/CAE/CAM en los procesos de arranque de viruta para mejorar la eficiencia del proceso ya que con este podemos simular las operaciones y diferentes variables del proceso antes de que este se fabrique sea implementado.

En la actualidad se han desarrollado centros de mecanizado cada vez más complejos que cuentan con mayor nmero de ejes de rotación en comparación con maquinaria convencional que por lo general cuentan con 2 o 3 ejes, por tanto, los CNC con 4 o 5 ejes de rotación son mucho más difíciles en predecir los movimientos de los accesorio o dispositivos móviles además el posicionamiento de la herramienta, por esto, es una necesidad hacer uso de software CAM para realizar la programación de las operaciones y posterior simulación del proceso[4].

La simulación del proceso de mecanizado consiste en modelar virtualmente la maquina CNC, esto quiere decir que cada uno de sus componentes se deben modelar y ensamblar paramétricamente teniendo en cuenta las restricciones de movimiento. También se debe integra un controlador [5] virtual que emule el de la maquina real y este esté en capacidad de interpretar los códigos numéricos (NC). Este proceso permite al programador visualizar el proceso y verificar los posibles errores (colisiones, parámetros de corte, movimientos de la herramienta y pieza, operaciones) y generar el código NC.



Fuente: Yamid Gonzalo Reyes, Trabajo de grado

Como se muestra en la ilustración 52. Existen 3 tipos de simulación: (1) visualización CAM, solo se limita a simular la trayectoria de la herramienta de corte y no el movimiento de esta en la máquina (2) Simulación IS&V, simula el proceso de corte de la herramienta y su movimiento alrededor del proceso (3) simulación avanzada IS&V, realiza la simulación completa del proceso en él se ve todo el proceso de corte, movimiento que se imitaran a las reales.

Para lograr operaciones avanzadas en el centro de mecanizado la mejor herramienta de simulación de los sistemas CAD/CAE/CAM es la simulación avanzada IS&V debido que con esta herramienta se puede visualizar todo lo que sucede en el proceso de mecanizado como lo es parámetros de corte, simulación de macros y comandos M, G y H [5]. El uso de esta herramienta de simulación puede ser de importancia para el proceso de diseño-fabricación al compararlo, como resultado, se obtienen reducción en los costos debido a la eliminación de tiempos muertos, reducción de intervenciones manuales por el operario y minimizar los riesgos de colisión de la maquina o herramienta, esto no sería posible sin realizar este tipo de simulación.

El flujo de trabajo haciendo uso de las herramientas de simulación avanzada IS&V avanzado es como el de la ilustración 53, primero la pieza de trabajo pasa por un diseño y posterior mentes pasa al departamento de manufactura, estos ingenieros planifican el proceso y haciendo uso de software CAD/CAM generan estrategias y trayectorias en la máquina virtual de un especifico CNC, pos procesan y el código NC es llevado a la máquina para ser ejecutado directamente con la pieza de trabajo.

Ilustración 62. Diagrama de flujo para fabricación de por simulador



Fuente: Yamid Gonzalo Reyes, Trabajo de grado

5. GEOMETRÍA DEL IMPELLER

Para la determinación de las dimensiones geométricas del *impeller* es necesario establecer ciertos criterios o valores para su diseño a través de la metodología explicada en la sección 6.7 del marco referencial, con esto se realiza un diseño teórico del *impeller* para su posterior modelación en software CAD con herramientas de parametrización.

5.1 Características geométricas del *impeller*

Para comenzar con el diseño teórico del *impeller* se debe tener las condiciones de trabajo de la máquina y datos iniciales, para el diseño del TC centrífugo tendremos los siguientes datos de entrada:

Tabla 4. Condiciones de entrada al rodete

condiciones generales		
variable	unidades	valor
Q	m ³ /s	0,1
Pe	bar	1
te	K	288
n	rpm	15000
p2	bar	1,1

Fuente: Autor

Siguiendo la metodología descrita en la sección 6.7 se debe determinar la condición del aire con su presión (P_e) y temperatura (t_e); haciendo uso de las cartas psicométricas⁷ en donde se encuentran las características del gas (aire):

⁷ Se define como la medición del contenido de humedad del aire, es una ciencia que involucra las propiedades termodinámicas del aire húmedo, y el efecto de la humedad atmosféricas sobre los materiales.

Tabla 5. Características del aire en las cartas psicométricas

características del aire de entrada		
variable	unidades	valor
t1	C	15
humedad relativa	%	0
PV sat	mbar	17,0544
h	Kj/Kg	15
E0e (atmosférica)	bar	1,205
Ve	m3/kg	0,82670235

Fuente: Autor

Luego de determinar las características del aire se halla la relación de compresión $\epsilon_c = \frac{P_f}{P_e}$ y el salto energético total Ys:

Tabla 6. Relación de compresión en TC centrífugo

variable		valor	unidades
Ec	relación de compresión	1,1	----
E03	Ec*E0e	1,3255	----
h03	entalpia del aire a presión E03	21,15	Kj/kg
Ys	salto energético	6,15	Kj/Kg

Fuente: Autor

Teniendo Ys se calcula el número específico de revoluciones utilizando la ilustración 21.

Ecuación 31. Calculo del número específico de revoluciones para diseño de impeller teórico

$$\sigma = 2,18 n Q^{1/2} Y_2^{-3/4} = 2,18 * \frac{15000 \text{ rpm}}{60 S} * 0,1^{1/2} (6,15 * 10^3)^{-3/4} = 0,2399$$

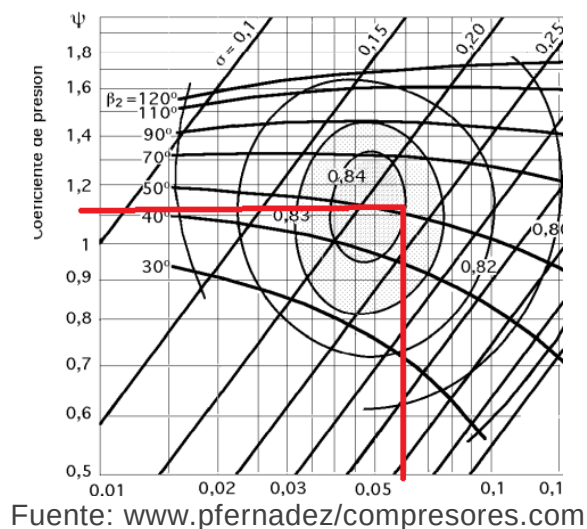
Para el valor de σ se mira la ilustración 63. Y se halan lo valores geométricos de la gráfica con un rendimiento alto de funcionamiento. Estos resultados son:

Ecuación 32. Datos geométricos del impeller iniciales

variable		valor	unidades
β_1	ángulo de entrada	30	°
β_2	ángulo de salida	50	°
ψ		1,15	----
d1/d2	relación de diámetros	0,49	----

Fuente: Autor

Ilustración 63. Diagrama de Eckert donde se ilustra la selección de los datos.



La velocidad periférica a la salida del rodete será:

Ecuación 33. velocidad periférica a la salida u_2

$$u_2 = \sqrt{\frac{2 Y_s 10^3}{\psi}}$$

Y el diámetro exterior del rodete:

Ecuación 34. Diámetro exterior del rodete

$$d_2 = \frac{u_2}{\pi n}$$

Y el diámetro interior:

Ecuación 35. Diámetro interior del rodete

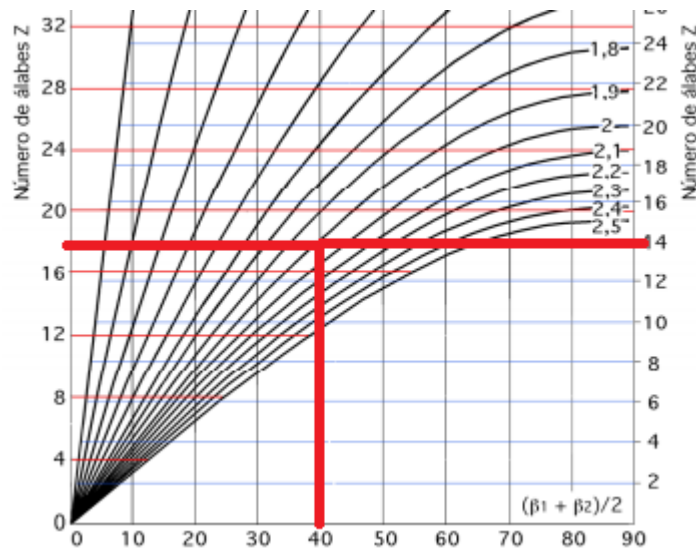
$$d_1 = \frac{d_1}{d_2} d_2$$

Teniendo estas medidas geométricas del rodete en la ilustración 26 se puede estimar el número de álabes teniendo en cuenta el ángulo medio de los álabes.

Ecuación 36. Angulo medio

$$\frac{\beta_1 + \beta_2}{2}$$

Ilustración 64. Selección del número de alabes.



Fuente: www.pfernandez/compresores.com

Como se puede ver en la ilustración 55 se debe seccionar el número de alabes de acuerdo a la relación t/l que para este caso puede variar de 14 álabes o 17 álabes; para nuestro caso adoptaremos el menor para tener mayor separación entre álabes.

Tabla 7. dimensiones geométricas principales del impeller

variable		valor	unidades
u2	velocidad periférica salida	103,419786	m/s
d2	diámetro a la salida	0,13167816	m
d1	diámetro a la entrada	0,0645223	m
$\beta_1 + \beta_2 / 2$	ángulo medio de los alabes	40	°
z	# de alabes	17	----

Fuente: Autor

5.1.1 Triángulos de velocidad

El triángulo de entrada se muestra en la ilustración 56. Donde se hallaron los valores de las velocidades y componentes.

Ecuación 37. velocidad periférica a la entrada

$$u_1 = u_2 \frac{d_1}{d_2}$$

Ecuación 38.

$$c_{1m} = c_{1m} = u_1 \tan \beta_1$$

Ecuación 39.

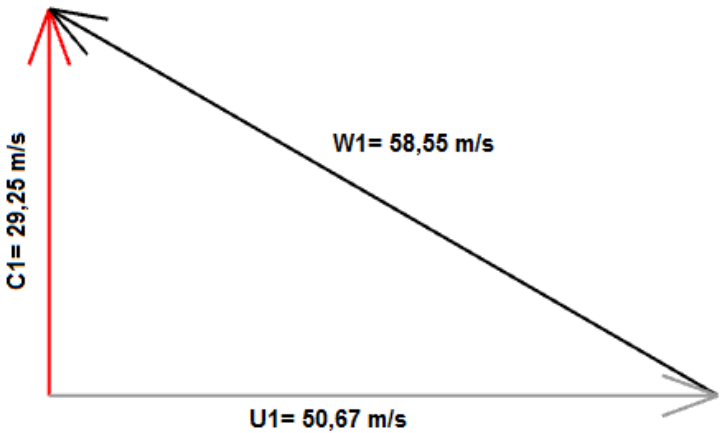
$$w_1 = \sqrt{u_1^2 + u_1^2}$$

Tabla 8. Valores triángulo de velocidad a la entrada

Triángulo de entrada			
u1		50,6756952	m/s
c1=c1m		29,2576263	m/s
w1		58,5152526	m/s

Fuente: Autor

Ilustración 65. Diagrama triángulo de velocidad a la entrada



Fuente: autor

Triángulo de salida.

En el triángulo de salida haremos:

$$c_{1m} = c_{2m}$$

Teniendo en cuenta la sección 6.6 factor de disminución de trabajo se calcula c_{1m} de 2 formas.

- Con número infinito de álabes:

Ecuación 40. Calculo de c_{2m} con número infinito de álabes

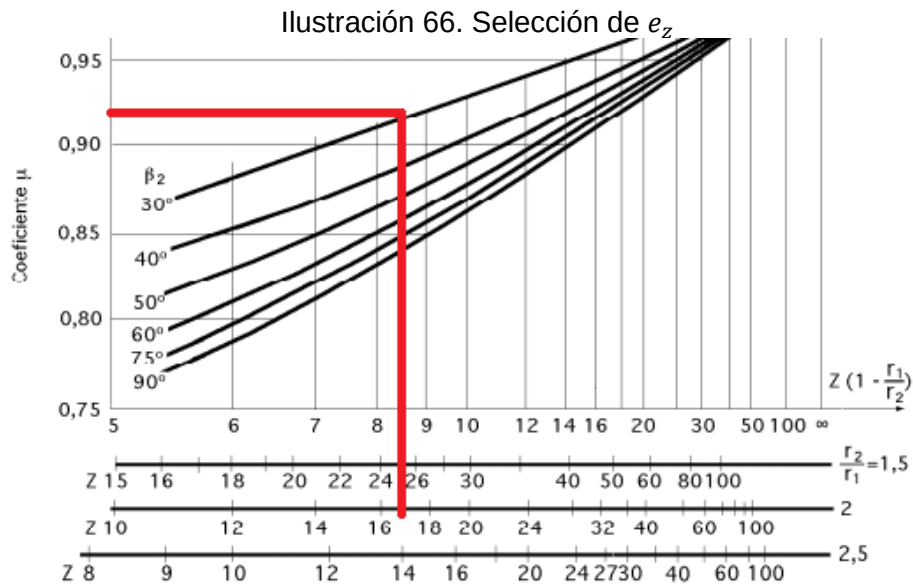
$$c_{2m} = u_2 - c_{2m} \cot \beta_2$$

- Con numero finito de álabes:

Ecuación 41. Calculo de c_{2m} con numero finito de álabes

$$z \left(1 - \frac{d_1}{d_2} \right) =$$

Como se vio en la sección 6.6 se debe utilizar la ilustración 20 para determina e_z con numero de álabes finito e infinito. El valor de $e_z = 0,92$.



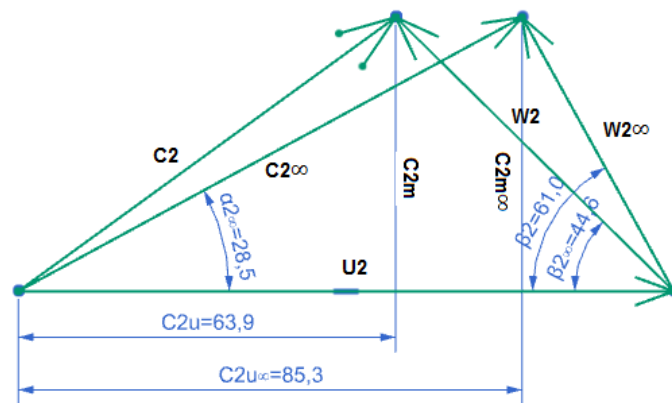
Fuente: www.pfernandez/compresores.com

Tabla 9. Valores triangulo de velocidad a la salida

C_{2m}	c _{1m} =c _{2m}	29,2576263	m/s
C_{2u∞}	Número infinito de alabes	78,8697228	m/s
	numero de alabes finito	8,5	----
e_z	Factor de deslizamiento	0,92	----
C_{2u}		72,5601449	m/s
C₂		78,2367134	m/s

Fuente: Autor

Ilustración 67. Diagrama triangulo de velocidad a la salida



Fuente: Autor

5.1.2 Trabajo interno

Depreciando las pérdidas por rozamiento de disco:

Ecuación 42. Perdidas por rozamiento

$$Y_i = Y_u = u_2 c_{2m}$$

Las pérdidas internas (o hidráulicas) serán:

Ecuación 43. Perdidas internas de energía

$$y_i = Y_i - Y_s$$

Con estos datos ya se conoce el estado termodinámico del aire en las siguientes secciones de control.

- Entrada del compresor: subíndice E
- Dentro del compresor, en la boca de aspiración A antes del rodete: subíndice a.
- Entrada de los álabes: subíndice 1
- Salida de los álabes: subíndice 2

$$V_E = V_{E\ tot} = \frac{286,9 * 288,15}{1 * 10^5} = 0,8267\ m^3/kg$$

Si se desprecia las pérdidas entre E y A se tendrá:

$$P_{a\ tot} = P_{E\ tot} = 1\ bar ; \quad T_{a\ tot} = T_{E\ tot} = 288,15\ K ; \quad V_{a\ tot} = V_{E\ tot} = 0,8267\ m^3/kg$$

Las magnitudes estáticas en la sección A se obtienen suponiendo una velocidad conveniente en dicha dirección. Para evitar desprendimientos de la corriente a la entrada de los álabes se procura que la corriente se acelere suavemente desde la entrada del rodete. La práctica aconseja es hacer $c_a = 0,85$ a $0,95$, para este caso de diseño se tomo $c_a = 0,91$.

Tabla 10. Propiedades del aire

propiedades del aire			
Variable		Valor	Unidades
γ	Gama del aire	1,4	----
C_a	velocidad de cruce axial	73,638	m/s
R_a	constante del aire	286,4	N*m/ kg* k
C_p	calor específico a presión constante	1004	J/kg * k

Fuente: Autor

Además siendo un proceso adiabático e isentrópico:

$$P_a v_a^\gamma = P_{a\ tot} v_{a\ tot}^\gamma$$

Se hallaron los valores del volumen y la presión total y volumen total:

$$\text{Ecuación 44.} \\ V_a = \frac{V_{a\ tot}}{\left[1 - \left(\frac{c_a}{a_a} \right)^2 \frac{\gamma - 1}{2} \right]^{\frac{1}{\gamma - 1}}}$$

$$\text{Ecuación 45.} \\ P_a = P_{a\ tot} \left(\frac{V_{a\ tot}}{V_a} \right)^\gamma$$

$$\text{Ecuación 46.} \\ T_a = \frac{P_a V_a}{R_a}$$

Tabla 11. Propiedades del aire a la entrada

propiedades del aire			
Variable		Valor	Unidades
Va t_{ot}	Volumen a la entrada total	0,8267	m3/kg
Va	Volumen	0,844470025	m3/kg
Pa	Presión	0,970664573	bar
Ta	Temperatura	286,2071003	K

Fuente: Autor

Para calcular el estado del aire a la entrada y la salida de los alabes es conveniente estimar las perdidas internas en cada zona del compresor, como se indica a continuación; el sistema difusor consta de una sola caja espiral (sin corona directriz previa), esto es con el fin de reducir a $\frac{1}{4}$ la velocidad de salida del rodete.

- Perdidas hasta la entrada de los alavés: $Y_{a-1} = \zeta_1 \frac{c_2^2}{2}$
- Perdidas en el rodete: $Y_{1-2} = \zeta_2 \frac{w_1^2}{2}$
- Perdidas en el difusor: $Y_{2-3} = \zeta_3 \frac{c_2^2 - c_3^2}{2}$

Para estos coeficientes de perdidas las distintas pruebas recomiendan los siguientes valores:

- $\xi_1=0,1$ a $0,15$
- $\xi_2=0,2$ a $0,25$
- $\xi_3=0,25$

Para este caso se adopto los valores de $\xi_1=0,135$ $\xi_2=0,15$ $\xi_3=0,25$. Por tanto:

Tabla 12. Perdidas internas en el TC centrífugo.

perdidas internas dentro del compresor			
Variable		Valor	Unidades
Y_{a-1}	perdida hasta la entrada de los alabes	57,78058696	J/kg
Y₁₋₂	perdida en el rodete	428,0043478	J/kg
Y₂₋₃	perdidas en el difusor	717,3027339	J/kg
Y_i	pérdidas totales	7353,087669	J/kg

Fuente: Autor

Teniendo esto se hallo los diferentes valores termodinámicos en el rodete a la entrada y la salida:

Ecuación 47.

$$p_{1\ tot} = p_a \left(1 + \frac{c_a^2 + 2 * Y_{a-1}}{2 C_p T_a} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}$$

$$T_{1\ tot} = T_{a\ tot}$$

Ecuación 48

$$V_{1\ tot} = \frac{R_a T_{1\ tot}}{p_{1\ tot}}$$

Tabla 13. Estado termodinámicos totales a la entrada

estado de entrada 1			
p_{1tot}	Presión a la entrada total	0,953799055	bar
T_{1tot}	Temperatura a la entrada total	286,2071003	K
V_{1tot}	Volumen a la entrada total	0,859402336	m3/kg

Fuente: Autor

Estado estático en el punto 1:

Ecuación 49.

$$p_1 = p_{1\ tot} \left(1 - \frac{c_1^2}{2 c_p T_{1\ tot}} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}$$

Ecuación 50

$$T_1 = T_{1\ tot} \left(\frac{p_1}{p_{1\ tot}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$$

Ecuación 51

$$v_1 = \frac{R_a T_1}{p_1}$$

Tabla 14. Estados estáticos en la entrada del rodete.

Estado estático en el punto 1			
P1	Presión a la entrada real	0,948835986	bar
T1	Temperatura a la entrada real	285,7808012	K
V1	Volumen a la entrada real	0,862610848	m3/kg

Fuente: Autor

Para hallar el estado del aire a la salida del rodete se deberá tener en cuenta el trabajo interno de este, por tanto:

$$h_{2\ tot} = h_{E\ tot} + Y_i$$

$$T_{2\ tot} = T_{E\ tot} + \frac{Y_i}{c_p}$$

Luego se tiene:

Ecuación 52

$$p_{2\ tot} = \frac{p_{E\ tot}}{\left(1 - \frac{Y_{2-3}}{c_p T_{2\ tot}}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}}$$

Donde $p_{f\ tot}$ es la presión total a la salida del compresor. Adviértase que las pérdidas Y_{2-3} tienen lugar entre la salida del rodete y la salida del compresor, por tanto:

Ecuación 53.

$$V_{2\ tot} = \frac{R_a T_{2\ tot}}{p_{2\ tot}}$$

Tabla 15. Estados termodinámicos a la salida del rodete.

estado de salida 2			
T_{2tot}	temperatura a la salida total	295,3237925	K
P_{2tot}	presión a la salida total	1,109364812	bar
V_{2tot}	volumen a la salida total	0,762424887	m3/kg

Fuente: Autor

Para los estados estáticos en el punto 2 se tiene:

Ecuación 54.

$$T_2 = T_{2\ tot} \frac{C_2^2}{2 C_p}$$

Ecuación 55.

$$p_2 = p_{2\ tot} \left(\frac{T_2}{T_{2\ tot}}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}$$

Ecuación 56.

$$v_2 = \frac{R_a T_2}{p_2}$$

Tabla 16. Estado estático a la salida del rodete.

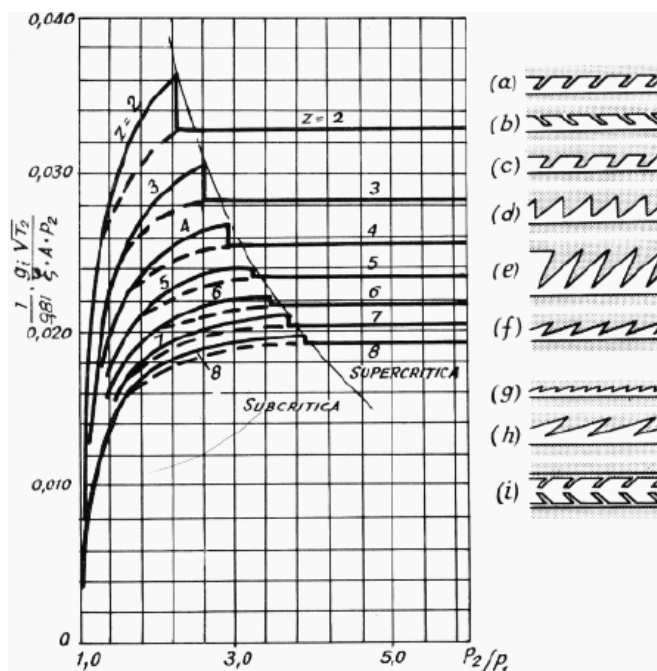
Estado estático en el punto 2			
T₂	temperatura a la salida real	292,275494	K
p₂	presión a la salida real	1,069801663	bar
V₂	Volumen a la salida real	0,782460005	m3/kg

Fuente: Autor

5.1.3 Rendimiento volumétrico

Este rendimiento dependerá del cierre laberíntico adaptado [1]. Prácticamente se puede prescindir de la fuga exterior g_e (perdidas intersticiales), que es pequeña. En la ilustración 33, se escogió el primer tipo cuyo coeficiente de caudal $\xi=1,29$ y se selecciona para el cierre $z=4$ elementos.

Ilustración 68. Caudal intersticial g_e reducido en función de la relación de compresión.



Fuente: turbomáquinas Claudio Mataix.

Para la lectura de la anterior de la ilustración se tendrá, $p_1/p_2=1,069/0,9488$ y la siguiente ecuación:

Ecuación 57.

$$\frac{g_i}{\xi_A} = \frac{\sqrt{T_{2 \text{ tot}}}}{p_2} = 0,2$$

El área transversal A del intersticio será:

$$A = \pi d_0 \delta_i$$

Donde d_0 es el diámetro medio de la corona intersticial y δ_i es la longitud radial del intersticio. De acuerdo con los resultados de ensayos y experiencias en diseño [1] con el fin de obtener una buena seguridad de marcha del compresor, se de hacer $\delta_i = 0,2$ mm. Luego, siendo el caudal en la sección A ya mencionada:

$$Q_a = \frac{\pi}{4} (d_a^2 - d_e^2) c_a$$

Se tendrá:

Ecuación 58.

$$d_a = \sqrt{\frac{4 Q_a}{\pi c_a} + d_e^2}$$

Sabiendo el caudal másico:

$$G = \frac{Q_E}{v_E} = \frac{0,1}{0,8267} = 0,1266 \text{ kg/s}$$

De esto se deduce:

$$Q_a = G v_a = 0,1266 \frac{\text{kg}}{\text{s}} * 0,8267 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} = 0,1021 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Para el eje se tomo un esfuerzo de torsión máxima admisible de $\tau = 19,6 \frac{\text{nm}}{\text{m}^2}$, el par transmitido por el eje del rodete será:

$$M = \frac{P_a * 60 * 10^3}{2 \pi n}$$

Donde P_a es la potencia de accionamiento en Kw y n las rpm. Para hallar la potencia de accionamiento se estimo un rendimiento total del compresor que de acuerdo a la seleccionada en la ilustración 28, $n_{tot} = 80\%$ al 84%. Con esto:

$$P_a = \frac{G Y_s}{n_{tot}} = \frac{0,1266 * 41,61}{0,80} = 6,29 \text{ kW}$$

El par será:

$$M = \frac{0,9298 * 60 * 10^3}{2 \pi 15000} = 4,0053 \text{ Nm}$$

Y según la ecuación de la torsión se tendrá:

$$d_e = \sqrt[3]{\frac{16 M}{\pi \tau}} = \sqrt[3]{\frac{16 * 0,5919}{\pi 19,6 * 10^6}} = 0,01013 \text{ m}$$

En la realidad se debe pasar el diámetro d_e a una media comercial, para este caso sería de 12,7 mm y por tanto se deberá recalcular el esfuerzo verdadero τ al que el eje se verá sometido. Sustituyendo los valores hallados para Q_a y d_e en la ecuación 58. Se tendrá:

$$d_a = \sqrt{\frac{4 * 0,1021}{\pi * 73,64} + 0,01013^2} = 0,04323 \text{ m}$$

$$A = \pi * 0,01013 * 0,2 * 10^{-3} = 0,00634 \text{ cm}^2$$

Y el caudal intersticial g_i , según la ecuación 57 será:

$$g_i = \frac{0,24 * 1,29 * (6,3648 * 10^{-6}) * (1,069 * 10^5)}{9,81 * \sqrt{295,32}} = 0,00125 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Finalmente el rendimiento volumétrico es:

$$n_v = \frac{G}{G + g_i} = \frac{0,1209}{0,1209 + 0,00125} = 0,9894 \approx 98,94\%$$

5.1.4 Cálculos finales

El ancho a la entrada de los alabes será:

Ecuación 59.

$$b_1 = \frac{\frac{G v_1}{n_v}}{\pi d_1 c_{1m}}$$

Donde se ha tenido en cuenta que el caudal bombeado por el rodete no es $G * v_1$, sino $\frac{G v_1}{n_v}$.

El ancho del rodete a la salida será:

Ecuación 60.

$$b_2 = \frac{\frac{G v_2}{n_v}}{\pi d_2 c_{2m}}$$

El rendimiento interno del compresor sin tener en cuentas las perdidas intersticiales, llamado también rendimiento hidráulico será:

$$n_h = \frac{Y_s}{Y_i} = \frac{6,15}{7,353} = 0,8363 \approx 83,63\%$$

Los alabes los construiremos simplemente mediante un arco de circulo. El radio de este arco será:

Ecuación 61.

$$\rho = \frac{r_2^2 - r_1^2}{2(r_2 \cos \beta_2 - r_1 \cos \beta_1)}$$

Y el lugar geométrico de los centros de todos los álaves se encontrara en la circunferencia de centro el del rodete y de radio:

Ecuación 62.

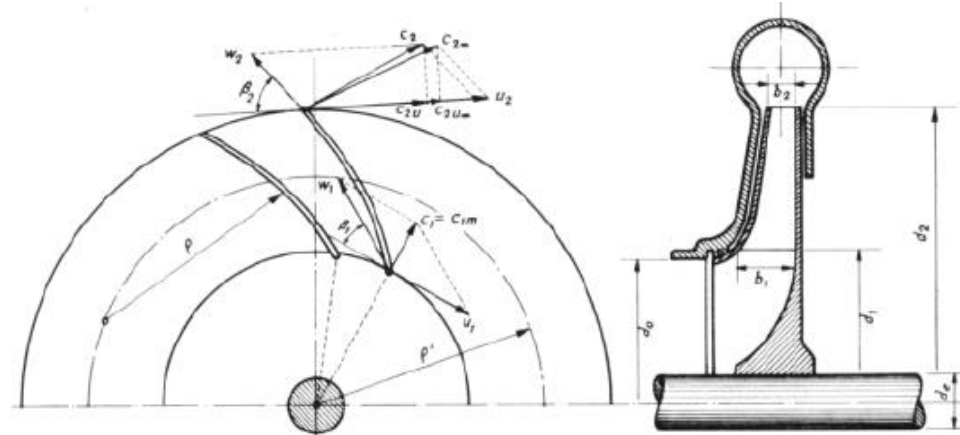
$$\rho' = \sqrt{r_1^2 + \rho^2 - 2 r_1 \rho \cos \beta_1}$$

Tabla 17. Dimensiones finales del rodete

diseño del eje			
b1	ancho de entrada de los alabes	0,017771814	m
b2	ancho del rodete a la salida	0,007899054	m
p	arco de circulo	0,114521666	m
p'	circunferencia centro del rodete	0,088072458	m

Fuente: Autor

Ilustración 69. Diagrama donde se representa las dimensiones principales del rodete que se hallaron



Fuente: turbomáquinas Claudio Mataix.

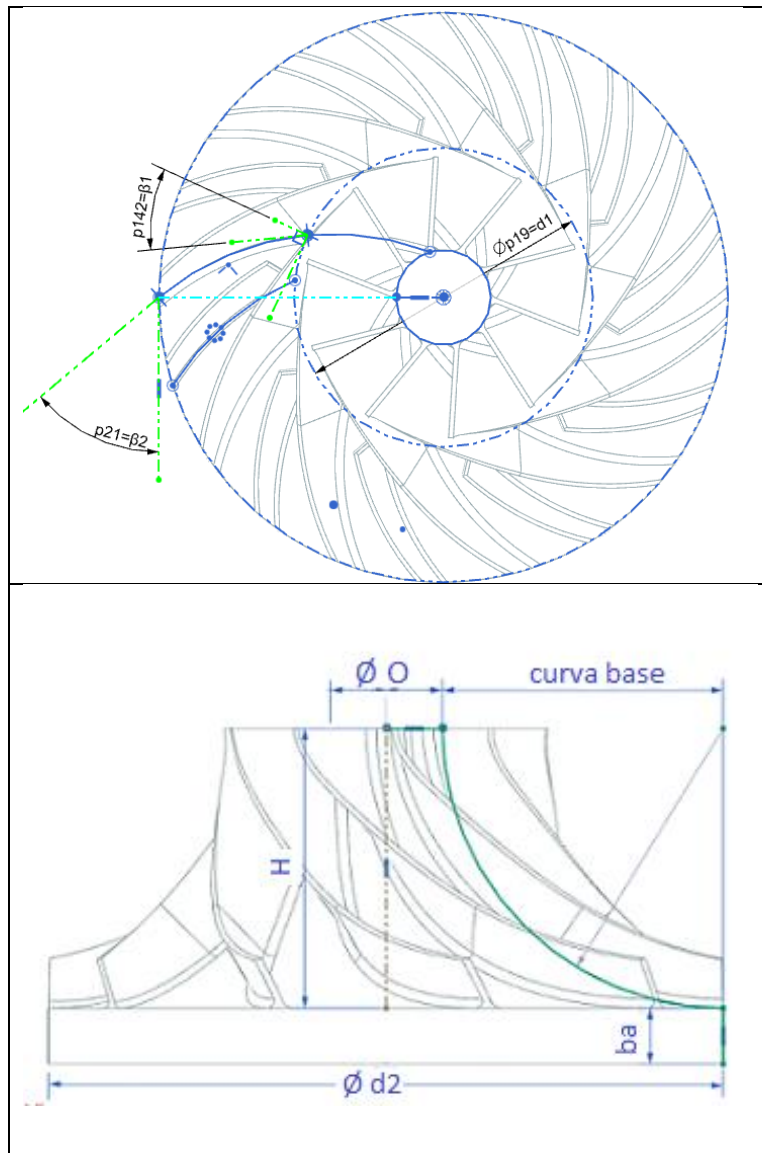
5.2 Diseño CAD paramétrico del *impeller*

En la sección 7.1. se establecieron las medidas generales del impeller que serán usadas para la parametrización del diseño CAD, la parametrización del CAD nos permitirá manipular la geometría sin tener que rediseñar desde el comienzo la pieza, esto será de gran ayuda ya que los ángulos de los alabes podría ser limitada por la tecnología 4+1 ejes por lo cual se realizarán pruebas CAM con diferentes geometrías del impeller con las que se podrán variar el número de álabes, alabes intermedios, alturas, diámetros, ángulos de entrada y salida.

Para la fabricación CAD del impeller se usará el software NX ya que brinda distintas herramientas de parametrización para el diseño del mismo, en el diseño paramétrico de la pieza se deberá realizar un análisis del diseño teniendo en cuenta las variables a parametrizar, en el caso del impeller se realizará una parametrización total, la cual nos va a permitir realizar diferentes manipulaciones geométricas sin que se dañe la integridad del archivo CAD.

En las siguientes imágenes se especifican las variables que serán manipuladas

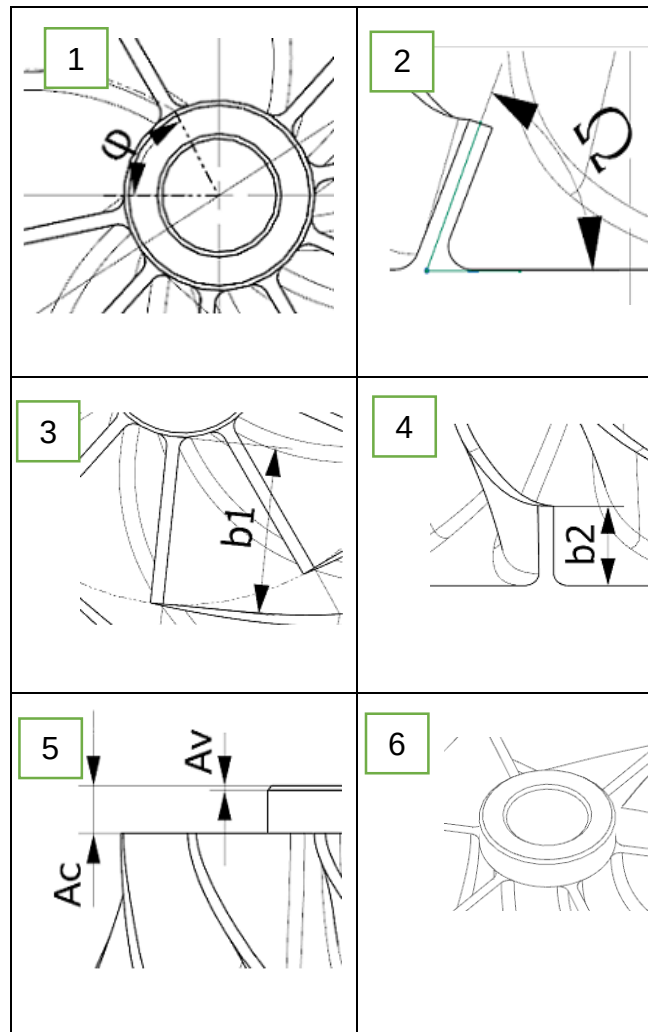
Ilustración 70. Vista superior y frontal del impeller



Fuente: Autor

En las imágenes se ilustran las magnitudes geométricas manipulables, pero están serán dependientes de una medida general como lo será el diámetro d_2 ya que dependiendo de este diámetro se determinarán los rangos del diámetro 1 también el diámetro del ojo del impeller; otras variables manipulables serán el número de alabes, si se usan alabes intermedios, ángulo de inclinación, ángulo de entrada axial, diámetro agujero del eje, alturas de los alabes b_1 y b_2 . Como se ve en la ilustración 62.

Ilustración 71 variables de entrada (1). ángulo de entrada axial, (2) ángulo inclinación del impeller, (3) altura del alabe b1, (4) altura del alabe b2, (5) altura del avellanado y altura base, (6) agujero para el eje.

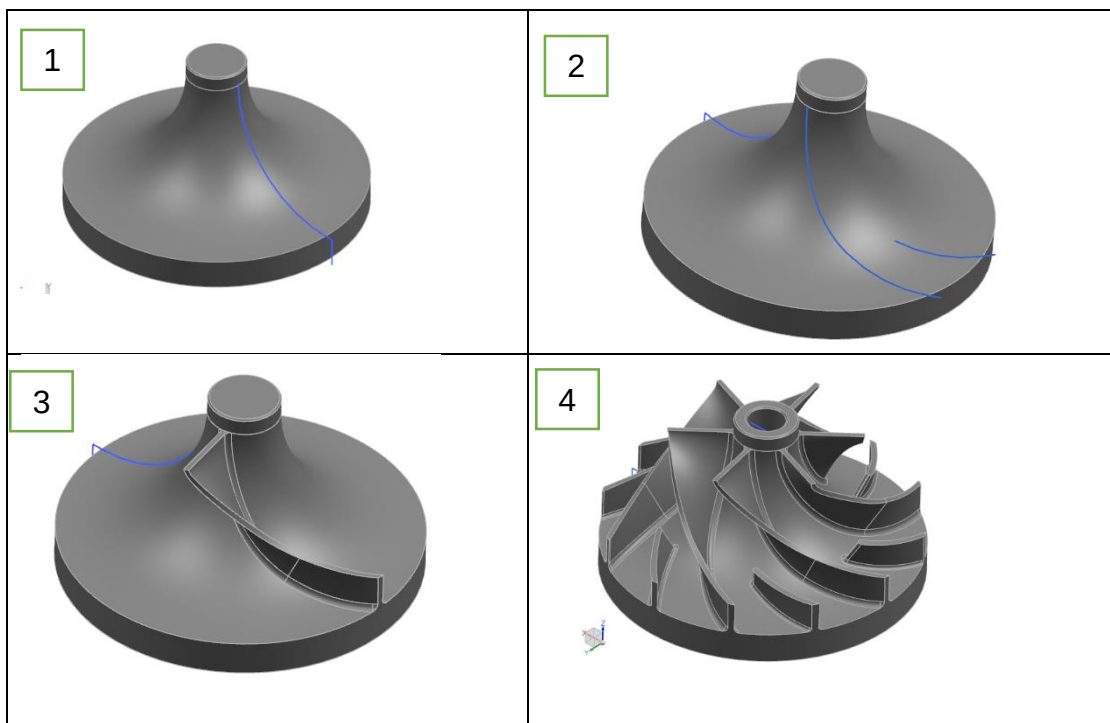


Fuente: Autor

Es importante establecer rangos y analizar los límites por medio de condicionales para crear un programa en el cual el usuario no dañe la pieza CAD. Para poder realizar estas manipulaciones se debe realizar el CAD no parametrizado para verificar que herramientas de NX se pueden usar y como se pueden manipular, para esto se toma el diseño matemático y se procede a pasar estas medidas a el modelo, en los planos CAD como se ve en la ilustración 62 con las líneas verdes estas

delimitan el plano inicial en el cual se genera una revolución sobre el cual los alabes van a ser extruidos. Ya con esta operación se procede al diseño de los alabes (ilustración 61) estas curvas son proyectadas sobre la parte cónica como se observa en la ilustración 63. Ya con el diseño CAD se verifica si el CAD es reconocido para pasar a la manufactura (CAM), es impórtate hacer la verificación ya que si no se establecen las uniones de las operaciones no se podrá desarrollar la manufactura, como en el caso de los pattern con las cuales se copian las operaciones de los alabes Nx, cuenta con dos formas de hacer patrones uno llamado *feature* y otro *geometry*, la diferencia de estas operaciones es que el *geometry* es más visual y reconoce los alabes aparte de la revolución de la pieza, mientras en *feature* tiende a ser más completo y no permite errores por lo cual este si va a ser reconocido por el CAM mientras la otra operación no.

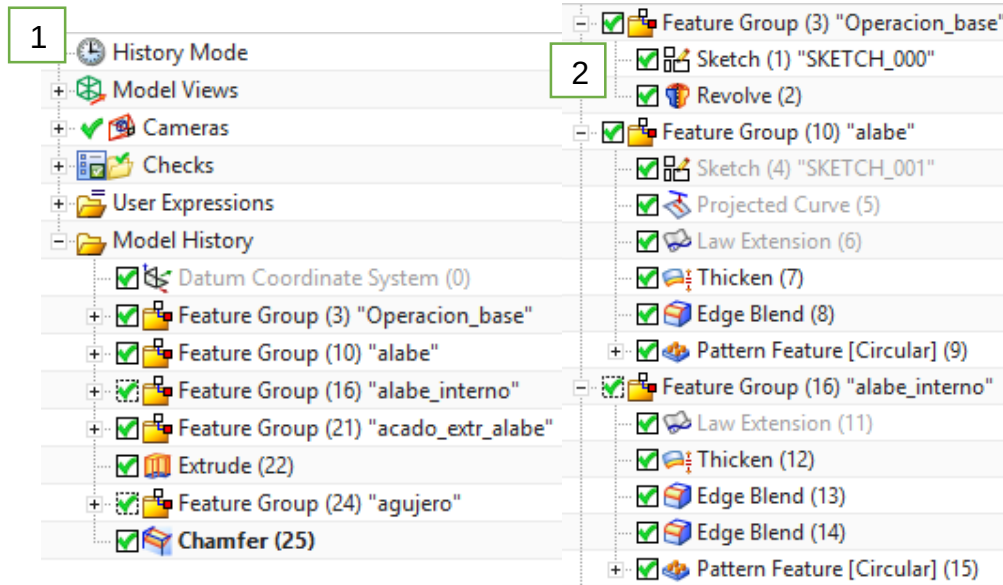
Ilustración 72 Secuencias diseño CAD (1) Revolución, (2) proyección curva de los alabes. (3) extrusión del alabe, (4) impeller terminado



Fuente: Autor

Con la geometría ya establecida se procede a ordenar las operaciones que se van a usar colocándolas en carpetas separadas, esto permite eliminar un grupo de operaciones si es requerido como las operaciones de taladrado y las operaciones que comprenden el desarrollo de los alabes internos, en la imagen se ve la estructura ordenada de las operaciones.

Ilustración 73 Features (1) organización en grupos, (2) operaciones.



Fuente: Autor

Con los grupos debidamente ordenados se empiezan a realizar los condicionales los cuales son asignados en la *expressions* en la pestaña *tools*. Los condicionales empezaran a ser determinados con el diámetro d2 y según por la geometría y características se estableció la siguiente tabla que se usa para la parametrización de los diámetros

Tabla 18 Rangos de diámetros

	ECUACIÓN
d2	$85 < d2 < 500$
d1	$d2 * 0.7 < d1 < d2 * 0.35$
do	$0.24 * d2 < Do < 0.2$

Fuente: Autor

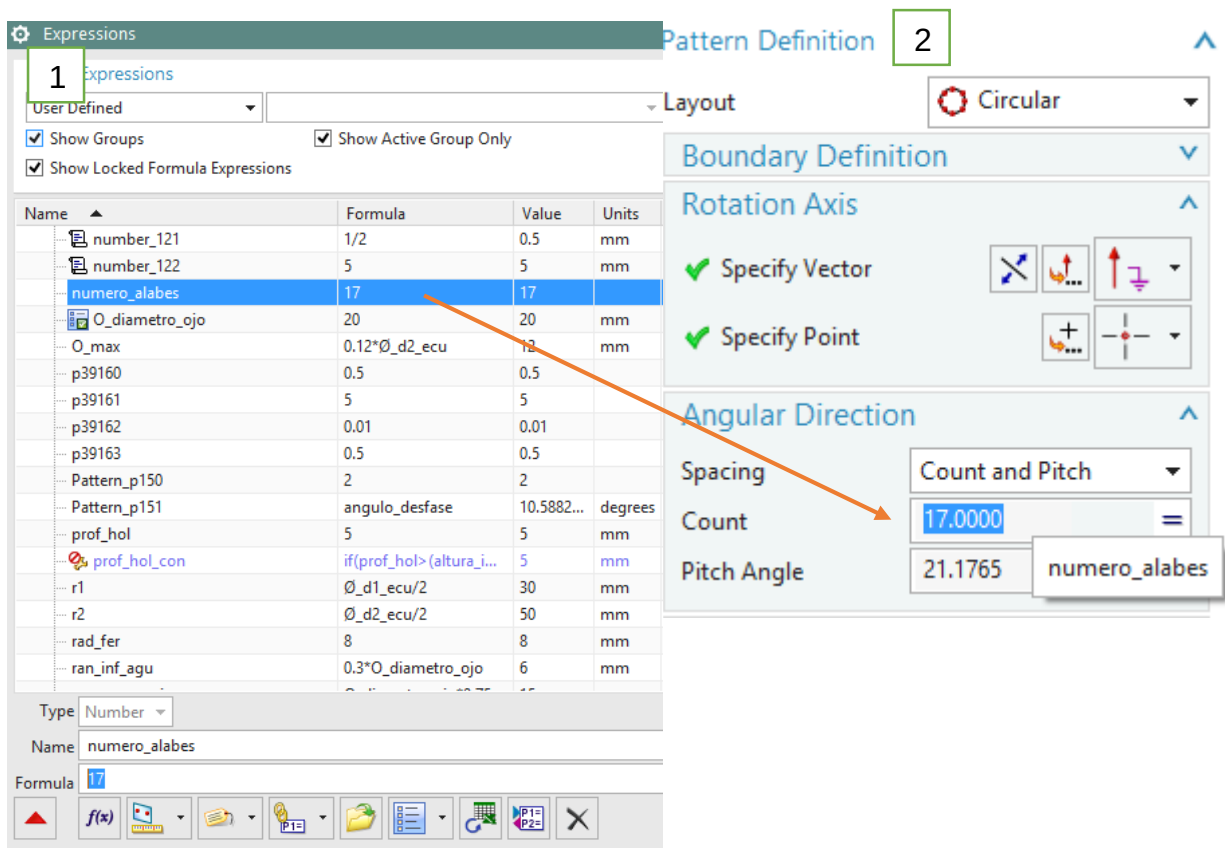
La parametrización se realizará haciendo uso de los condicionales *if*, *then* y *else*, en algunas ecuaciones se deberán usar condicionales anidados para poder parametrizar ya que d1 y dO dependen del diámetro d2, para realizar las parametrizaciones de los ángulos de igual manera se usarán condicionales pero ligados con la herramienta *PTS author (product template studio)*. Con esta

herramienta se podrán crear listas para la parametrización de los ángulos como también por medio de las *expressions*, se podrá parametrizar por medio de datos booleanos para quitarlas o añadirlas como lo son los alabes internos y agujero del eje, de esta manera se empieza a ordenar los datos de entrada que se verán reflejados en una salida visible en el la pieza CAD.

Es importante dejar todas las operaciones dependientes de variables establecidas por el programador ya que cada variable será un dato de entrada que será modificada en la interface, en la siguiente imagen se observa la *expression* establecida como lo es el número de alabes y la designación de esta en la operación de patrón circular

Ilustración 74 designación de valores

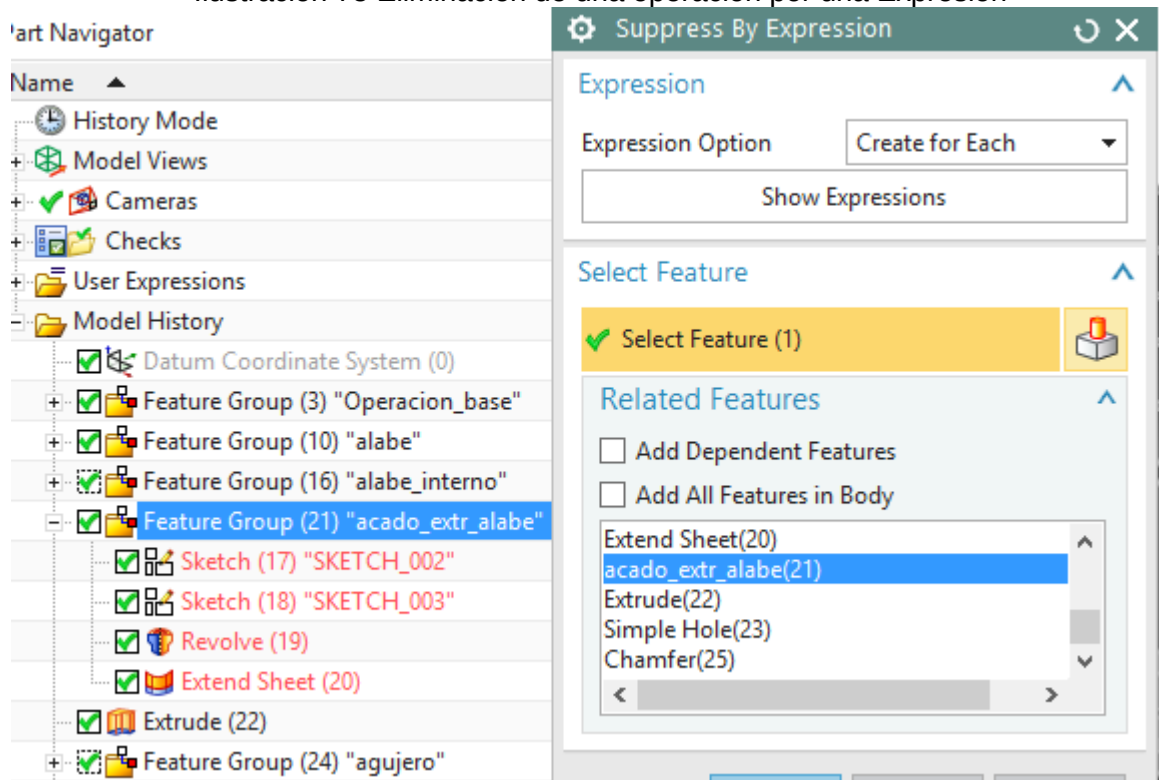
(1) *Expresiones*, (2) patrón circular.



Fuente: Autor

Es importante también designar las operaciones o grupo de operaciones que van a ser usadas para la parametrización del impeller que van o no a ser usadas como dato de salida para esto como ya se había ilustrado, pero para poderlo determinar como un dato booleano se debe designar como una *expression* 1 para crearla y 0 para eliminarla como vemos en la ilustración.

Ilustración 75 Eliminación de una operación por una Expresión



Fuente: Autor

Con la operación de *suppress by expression* se parametrizaron las operaciones de agujero y los alabes internos que se ven en casillas punteadas en la anterior imagen. Al ya tener designadas toda las formulas (ecuaciones, booleanos, condicionales, constantes y magnitudes) ya se procede a realizar la interface la cual permitirá ordenar la información y crear una interface para el usuario, para empezar a ordenar la información se debe tener en cuenta cómo va estar ordenado el programa teniendo en cuenta cuales van a ser los datos de entrada los cuales el usuario manipula, en los anexos se encuentra el flujograma que explica todo el proceso que se parametrizara en el programa.

Para crear la interface con la herramienta *Product Template Studio* se procede a ordenar los datos de entrada en grupos, como lo son las dimensiones generales y características del alabe y operaciones adicionales (agujero, altura base y altura de avellanados). Estos grupos son ordenados en los *collapsibles Groups* y *Tab controls*, dentro de estos grupos se van a ordenar las *expressions* que se designaron para parametrizar el modelo, cada una de las ecuaciones, booleanos, condicionales, constantes y magnitudes se le deberá asignar un mecanismo de control ya sea con una lista, *scale*, *spin*, *keyin*, *checkbox*, *etc*. Según sea el caso cada una de estas herramientas esta explicada en el marco teórico.

La interface diseñada está dividida en tres grupos, el primer grupo es el de Dimensiones generales el cual tiene dos subdivisiones, la primera subdivisión tiene los datos de entrada para dimensionar la vista frontal mientras el segundo subgrupo dimensiona la vista superior dentro de esta se dimensionan los diámetros, ángulos de entrada y salida y altura de la base, en la siguiente imagen se podrá observar la interface en los cuales se pueden ver los rangos mínimos y máximos que van a depender del diámetro 2, como también un botón de alerta que si no se cumplen los diámetros establecidos el programa establecerá por defecto los máximos y mínimos según sea el caso.

Ilustración 76 Interface dimensiones generales

The image displays two side-by-side screenshots of a software interface titled "Impeller interface".

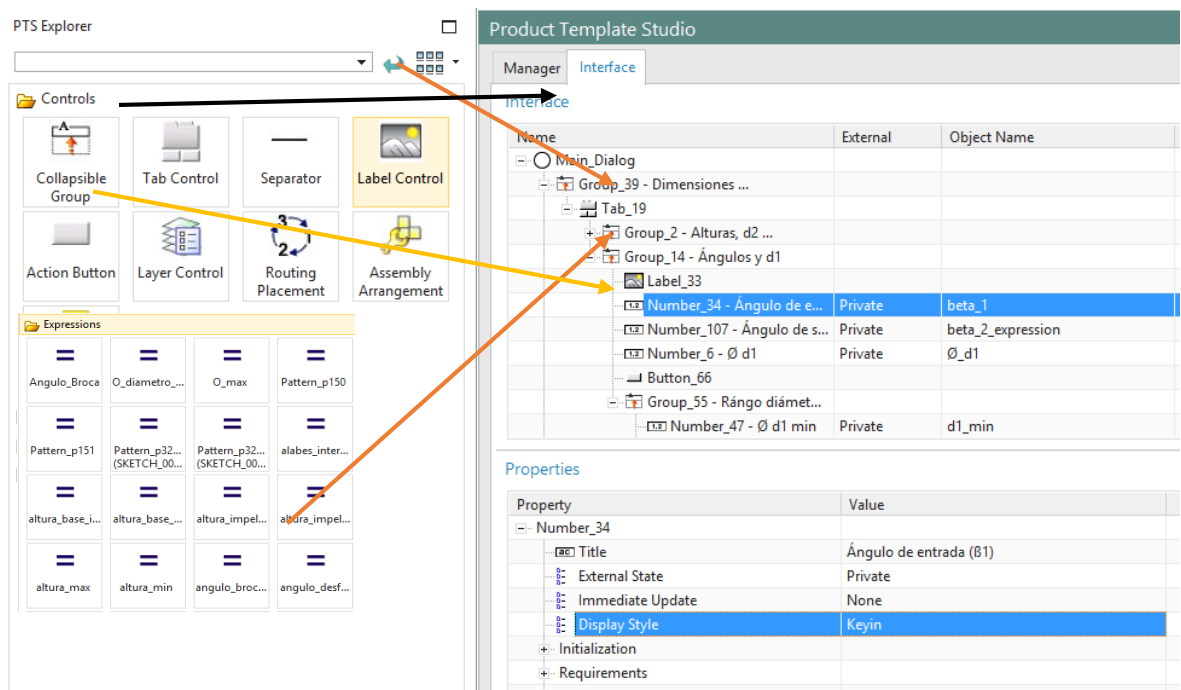
Left Screenshot (Alturas, d2 y dO): Shows a 2D cross-section of an impeller. Dimensions labeled include $\varnothing d2$, $\varnothing O$, H , ba , and "curva base". Below the diagram are input fields: $\varnothing d2$ (100), $\varnothing O$ (20), "Altura del impeller (H)" (40), "verificación medidas" (checked), "Altura base (ba)" (10), and a "Rangos de diámetros" section with min/max values for $\varnothing d2$, $\varnothing O$, and height.

Right Screenshot (Ángulos y d1): Shows a top-down view of the impeller. Dimensions labeled include $B1$, $B2$, and $\varnothing d1$. Below the diagram are input fields: "Ángulo de entrada (B1)" (40), "Ángulo de salida (B2)" (30 deg), $\varnothing d1$ (60), "verificación_d1" (checked), and a "Rango diámetro d1" section with min/max values for $\varnothing d1$.

Fuente: Autor

Para establecer la interface es modificada todo dentro de la herramienta *product template studio* para la primera parte de la interface solo se usaron el ingreso de datos por un valor cualquiera designado por el usuario *keyin* pero si sal el mensaje de error (una X en el botón de verificación), por los condicionales establecidos en las *expression* la interface por defecto seleccionara los rangos establecidos como se mencionó anteriormente.

Ilustración 77 Organización del PTS



Fuente: Autor

Todos los grupos son diseñados con los mismos controles, pero las *expression* cambian la forma con las que el usuario interactúa para ingresar los datos que modifican la pieza, dentro el segundo grupo son las características del alabe entre las cuales se colocaran barras deslizantes y checkbox las cuales van a permitir que el usuario seleccione si el impeller tendrá alabes intermedios o no, y de igual manera pasara con la operación del agujero, en la siguiente imagen se cómo se estableció la interface según el flujograma.

Ilustración 78 Product template Studio (1) dimensiones frontales d2,d1 y alturas. (2) dimensiones superiores d1, ángulos de entrada y salida. (3) pestaña alabes selección de alabes internos, selección número de alabes y el ángulo de entrada axial. (4) selección de la inclinación de alabe, redondeos y espesor del álabe

1

Dimensiones generales

Alturas, d2 y dO

Ángulos y d1

Ø d2

100

mm

Ø O

20

mm

Altura del impeller (H)

40

mm

verificación medidas

✓

Altura base (ba)

10

mm

Rangos de diámetros

Ø d2 min

85.000000

Ø d2 max

500.000000

Ø O min

20.000000

Ø O max

24.000000

Altura min

26.000000

Altura max

50.000000

2

Dimensiones generales

Alturas, d2 y dO

Ángulos y d1

Ángulo de entrada (B1)

40

deg

Ángulo de salida (B2)

50

deg

Ø d1

60

mm

verificación_d1

✓

Rango diámetro d1

Ø d1 min

35.000000

Ø d1 max

70.000000

3

Alabes

Alabes internos

Número de alabes

Características

Dimensiones del álabe

Numero de alabes

1

17

Ángulo entrada axial (°)

45

60

90

4

Alabes

Alabes internos

Número de alabes

Características

Dimensiones del álabe

Ángulo de inclinación (°)

45

90

135

Redondeo álabe r(mm)

1.0000

Espesor álabe (mm)

1.0000

Alabes internos

Ángulo de Inclinación (°)

45

93

135

Redondeo álabe r(mm)

1.0000

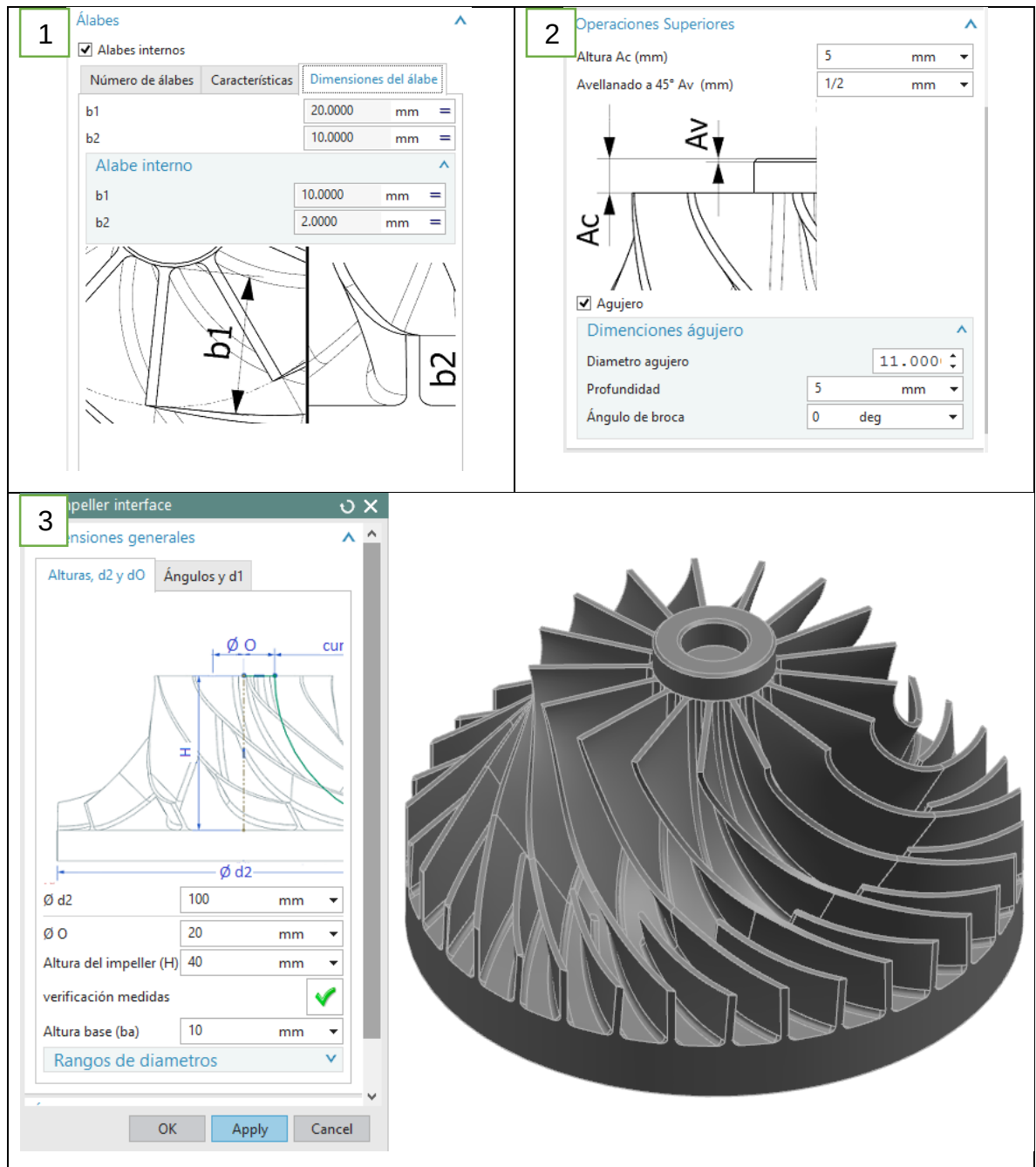
Espesor (mm)

1.0000

Fuente: Autor

100

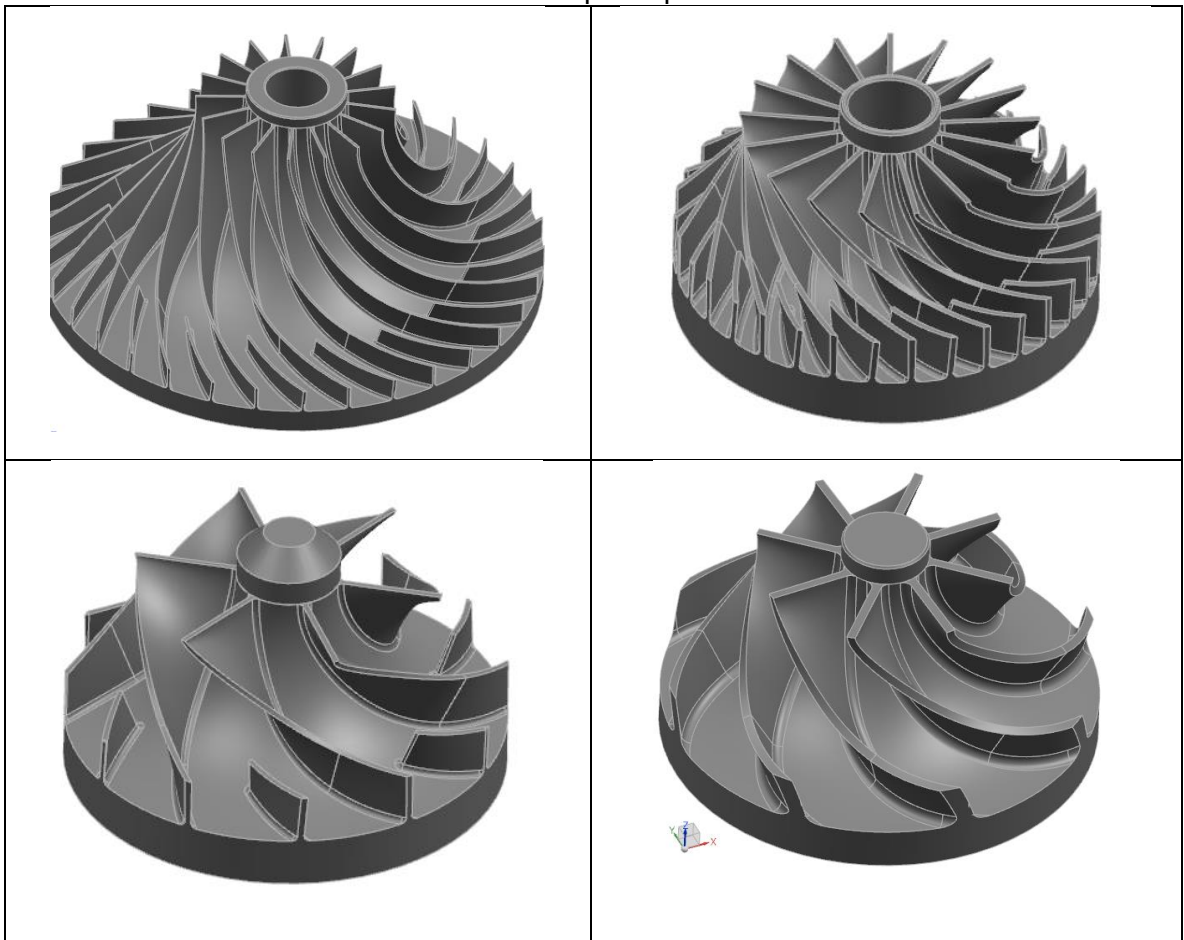
Ilustración 79 Product Template Studio (1) dimensiones del alabe b1 y b2. (2) operaciones superiores altura Ac, altura del avellanado. (3) diseño *Impeller interface*



Fuente: Autor

Con la interface ya diseñada se podrá desarrollar la manufactura, y a medida que se realicen los diferentes análisis CAM se podrá modificar las características geométricas según se requiera para poder hacer uso de la manufactura multi-eje sin que la geometría sea una limitante. En el anexo__ se podrá observar el plano con las variables las cuales serán modificadas en el programa para obtener la geometría ya sea con los datos matemáticos calculados o con variaciones para poder realizar la manufactura. En la siguiente ilustración se puede observar los diferentes tipos de impeller modificando la interface diseñada.

Ilustración 80 Impeller paramétrico



Fuente: Autor

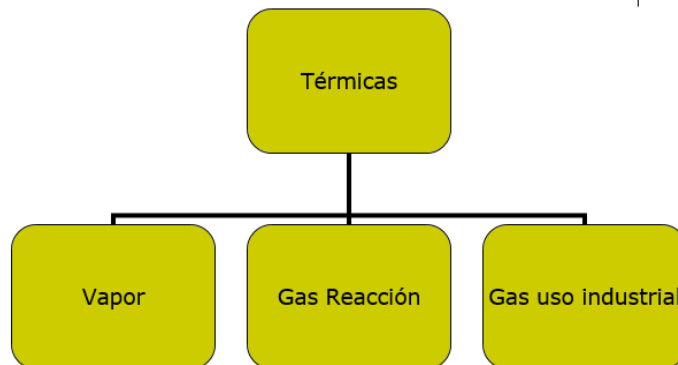
6. PLAN DE MANUFACTURA

Para realizar el plan de manufactura del *impeller* es necesario determinar varias variables como el material, dado que de este dependen las condiciones de corte para cada herramienta y el porcentaje de potencia consumida por la máquina. Después de esto se determina las dimensiones del material de acuerdo a la referencia comerciales y las limitantes de manufactura presente en la máquina y en la geometría del *impeller*; estas limitantes pueden ser el tipo de sujeción que determinaran la estabilidad de la pieza en el proceso. Se deberá determinar el tipo de sujeción apropiada para la manufactura del *impeller* teniendo en cuenta las limitantes ya mencionadas, esto quiere decir que deba ser una sujeción rígida, pero a la vez permita el libre movimiento de las herramientas. Para finalizar con el plan de manufactura se deberá analizar y seleccionar herramientas de corte para la manufactura del *impeller*; se debe buscar herramientas apropiadas que tengan un diámetro adecuado y una longitud de corte que permita un corte de material sin problemas.

6.1 Selección del material

Los *impeller* son empleados en distintos tipos de máquinas y varían su aplicación dependiendo al funcionamiento de la máquina o el propósito de estas; su aplicación principal es en las turbomáquinas donde es el elemento principal para el funcionamiento de estas máquinas. Para la fabricación de estos es necesario seleccionar un material que soporte las condiciones de trabajo de ambiente y temperatura y esfuerzos centrífugos.

Ilustración 81. Distintos tipos de gases presentes en el funcionamiento de un *impeller* dentro de una turbomáquina.



Fuente: Autor

Estos impeller están sometidos a distintos esfuerzos y deformaciones como son:

- Diminución del límite elástico
- A la entrada de un turborreactor existen temperaturas por debajo de los 0°C debido al efecto JOULE-THOMSON.
- El compresor está sometido a esfuerzos centrífugos elevados a temperaturas moderadas.
- La cámara de combustión esta sometidas a tensiones moderadas a temperaturas elevadas
- Los álabes de la turbina de gas pueden soportar elevados esfuerzos hasta de 1000°C.
- Se debe recurrir a gran variedad de materiales que aumentan el costo, esto representa un problema porque hace que el factor de mantenibilidad sea bajo y dificulta la operación.

Estos materiales empleados en la fabricación de distintos tipos de *impeller* y turbinas necesitar tener ciertas propiedades la culés son:

- Alta resistencia mecánica
- Ductilidad. Esfuerzos térmicos por restricción
- Estabilidad de la microestructura (crecimiento del grano)
- Resistencia a la corrosión a elevadas temperaturas
- Conductividad térmica. Esfuerzos térmicos por gradiente de temperatura

Para cada una de sus aplicaciones los materiales del impeller tienen ciertas características para soportar las condiciones de trabajo algunos materiales empleados en las turbinas de vapor son:

- Para los escalonamientos de bajas temperaturas pero con esfuerzos centrífugos altos a causa de la longitud de los álabes se usa acero SAE 4340
- En las turbinas de vapor de gran potencia (300000 kW) se utilizan aleaciones de titanio (330 MPa a 650°C- 115 MPa a 650°C)

Para las turbinas de gas:

- Álabes fijos y toberas: debido al tipo de fluido de trabajo este tipo de materiales sufre de erosión, oxidación, abrasión y fallas térmicas. Para este tipos de ambiente de trabajo y fallas son ideales las aleaciones de cobalto (CR 21%, W 7 %)
- Álabes: aleaciones similares también a base de níquel (nimonic: CR 15%, Co 15%, Mo 3,5%, Ti 4 %)

Para las turbinas de gas industriales:

- Se diseñan para una duración de varios años en lugar de algunos miles de horas a diferencia de la de reacción.
- La temperatura manejadas son menores
- El compresor maneja temperaturas máximas hasta los 300°C; si la temperatura es mayor y la relación de compresión es grande hay refrigeración intermedia. Los aceros empleados son al cromo (4140) para los alabes.

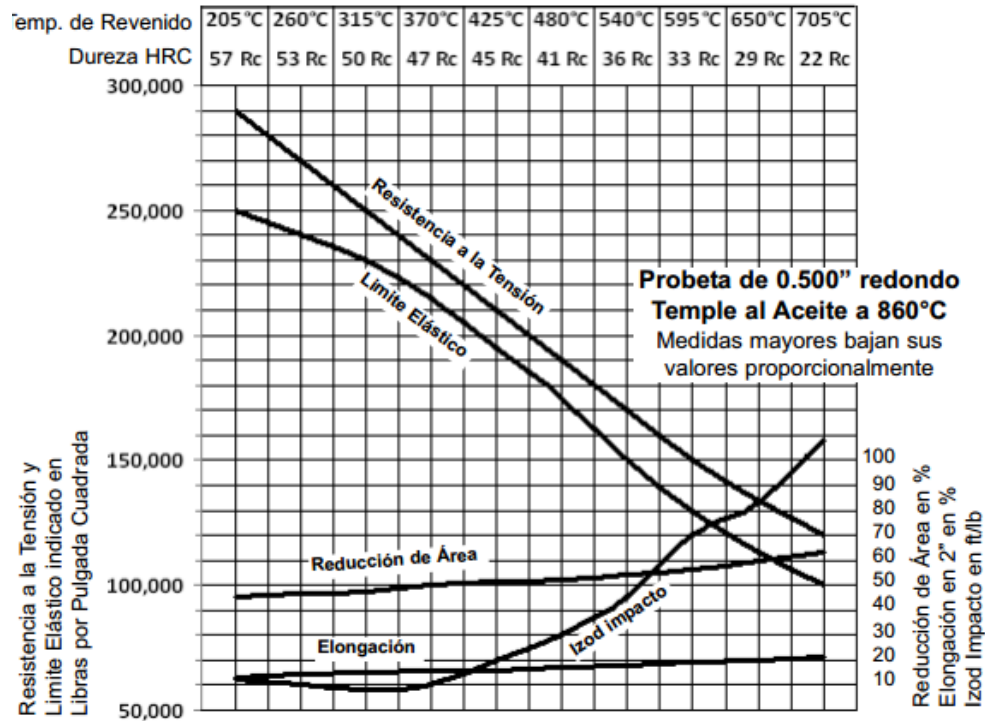
De la información anterior se puede concluir que el acero a emplear para el caso del impeller que se va a fabricar y que cumple con las características de trabajo detalladas en la sección 7 es el acero AISI-SAE 4140 para trabajos de baja relación de compresión. El acero AISI-SAE 4140 hace parte de la familia de aceros 41xx aceros microaleados de alta resistencia y de baja aleación; es un acero grado maquinaria al Cromo-Molibdeno con una dureza aproximada de 28/34 HRC, tienen buena resistencia a la tensión, torsión y la flexión. Normalmente no requiere un tratamiento térmico adicional, sin embargo este acero se puede templear para incrementar su resistencia. Es empleado en varias aplicaciones como en la construcción de vehículos, ejes, cigüeñales, pernos, engranajes y para producir aviones ultraligeros.

Tabla 19. Composición química y normas del acero AISI-SAE 4140

COMPOSICIÓN QUÍMICA - % PROMEDIO				
C	Mn	Si	Cr	Mo
0.40	0.90	0.30	1.00	0.20
NORMAS:				
SAE / AISI		DIN		
4140		1.7225 - 42CrMo4		

Fuente: Manufactura ingeniería y tecnología Kalpakjian.

Ilustración 82. Propiedades mecánicas del acero AISI-SAE 4140



Fuente: Aceros servicio industrial S.A

Sin embargo, como el propósito del trabajo de grado es desarrollar un plan de manufactura para el *impeller* en un centro de mecanizado de 4+1 ejes no es necesario fabricarlo en un material ideal para su funcionamiento real si no en un material donde su fabricación sea sencilla y sirva de demostración de ente tipo de manufactura avanzada. El material seleccionado para esto es el aluminio AA 7075 T6 mejor conocido como “Zicral”. Es una aleación de aluminio con Zinc. Este tipo de aluminio tiene buena resistencia a la fatiga y es fácil mecanizar, ofrece resistencia a la corrosión y combinado con su resistencia mecánica lo hace adecuado para aplicaciones estructurales. La serie 7057-T6 es una aleación templada que tiene una resistencia a la tracción de 510 a 538 MPa.

Algunos usos de la serie 7000 son empleados en aplicaciones como el transporte como en embarcaciones navales, la aviación y los autos. En algunas marcas de motocicletas se usa para fabricar piñones y coronas por su resistencia y ligereza. Otra propiedad es su dureza, alta densidad, propiedades térmicas y la posibilidad de ser pulido, el AA 7075 es ampliamente usado en la fabricación de herramientas moldes.

Tabla 20. Composición química del aluminio AA 7075

%	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Otros elementos		Al
Mínimo			1,20		2,10	0,18	5,10		Zr + Ti	Total	
Máximo	0,40	0,50	2,00	0,30	2,90	0,28	6,10	0,20	0,25	0,15	El resto

Fuente: alacer mas- ficha técnica

Tabla 21. Propiedades mecánicas del aluminio AA 7075

Estado	Espesor	Características a la tracción				Resistencia a la cizalladura τ N/mm ²	Dureza Brinell (HB)
		Carga de rotura Rm. N/mm ²	Limite elástico Rp 0,2, N/mm ²	Alargamiento A 5,65%	Limite a la fatiga N/mm ²		
0		225	105		230	150	60
T6	6 – 12	530	450	8	300	350	140
T6	12 – 25	530	450	5	300	350	140
T6	26 – 50	530	450	3	300	350	140
T6	51 – 63	500	430	2	300	350	130
T6	63 – 75	480	410	2	300	350	130
T6	75 – 100	480	390	2	300	350	130
T7351		505	435	13	300	305	140

Fuente: alacer mas- ficha técnica

De la información anterior se puede concluir que el aluminio AA 7075 T-6 es un material ideal para fabricar el *impeller* por su factibilidad de maquinar y que ofrece un beneficio-costo considerable comparado con otros materiales. Para la dimensiones de este se consultó catálogos de diámetros comerciales del material que se ajusten a las medidas del *impeller* diseñado de acuerdo a las dimensiones especificadas en la sección 7 como el diámetro d_2 de 122 mm y la altura h de 60 mm.

Ilustración 83. Diámetros comerciales disponibles del aluminio AA 7075-T6

Diámetro mm	Peso kg/m	Aleaciones							
		Al 99,5	Al-Cu		Al-Mg-Si		Al-Mg		Al-Zn
		1050	2011	2030	6063	6082	5083	5754	7075
120	31,667		●	●		●	●		●
125	34,344			○					
130	37,165		●	●		●	●		●

Fuente: <http://www.sanmetal.es>

Como se muestra en la ilustración 37, hay 3 diferentes rangos de diámetros a emplear pero solo 2 presentes en la referencia 7075 de diámetros 120 y 130 mm el cual el único que cumple con la medida es el de diámetro de 130 mm.

6.2 Análisis de montaje en el centro de mecanizado

Para poder realizar un mecanizado estable del *impeller* es necesario establecer un sistema de sujeción que sea rígido; para esto se debe estudiar los diferentes tipos de sujeción presentes en el centro de mecanizado de la universidad Santo Tomas y ver cuál sería el más ideal y que permita cumplir con las características de un mecanizado estable. Los sistemas de sujeción buscan lograr que los centros de mecanizado hagan operaciones de corte sin interrupciones, es decir, que el proceso no se vea afectado para cambiar la posición del material para realizar cierto tipo de operación, por tanto, esto es causante de pérdida de tiempos y precisión por esto es importante definir un sistema de sujeción apropiado.

En la universidad Santo Tomas el centro de mecanizado cuenta con distintos sistemas de sujeción dentro de los cuales se encuentra la prensa de sujeción, los tornillos de apriete y la copa de sujeción; además de esto si es necesario se deberá diseñar un sistema de sujeción aparte de los existentes en caso de que estos no funcionen para la manufactura del *impeller*

Para determinar el tipo de sujeción hay que tener una planificación del proceso de manufactura o una metodología de determinación del proceso:

- Tipo de mecanizado
- Dimensiones del material y la capacidad de la maquina
- El tipo de material; herramientas; condiciones de corte

También hay una metodología de desarrollo en esta se describe:

- Determinación de las operaciones: restricciones geométricas, tecnológicas y económicas. Diseño y secuenciación de operaciones.
- Análisis de movimientos: trayectorias de mecanizado
- Operatividad: tiempos de mecanizado; selección de las herramientas y ajustes de las condiciones de corte
- Simulación del proceso de mecanizado

Toda la anterior planificación es necesaria para determinar una sujeción estable y se requiere de unos criterios para hacer una selección correcta de acuerdo a las características de mecanizado. Como el *impeller* es una pieza de geometría variable y compleja este presenta ciertas limitantes geométricas a considerar. Las restricciones geométricas y dimensionales generadas por los planos de la pieza. Para superficies de compleja manufactura en distintos tipos de máquinas herramientas se tiene la siguiente ilustración.

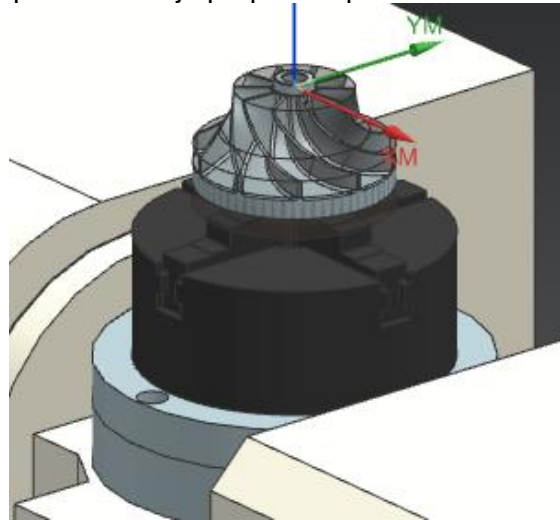
Ilustración 84. Limitaciones en diferentes clases de mecanizado para distintas piezas de mecanizado complejo

Operaciones costosas de realizar en elementos rotacionales.			
Máquina	Tipo de superficie	Orientación y naturaleza de la superficie	Ejemplo
Torno o torno vertical	Superficies externas (concéntricas)	Rosca, ranura operativa, superficie cónica	
		Rosca operativa	
	Superficies internas (concéntricas)	Rosca, ranura operativa, superficie cónica	
		Rosca operativa	
Fresadora o brochadora	Superficies planas auxiliares	Sección estriada o poligonal exterior; sección estriada pasante o poligonal interior	
Taladradora	Agujeros auxiliares	Agujeros cilíndricos no paralelos o perpendiculares al eje de la pieza pero en posiciones accesibles	
Generadora de engranajes	Dientes de engranaje	Dientes de engranaje concéntricos	

Fuente: <http://www.virtual.unal.edu.co>

Es consecuencia, si se analiza los tipos de sujeción con los que se cuenta el más idóneo es el uso de la copa porque permite una trayectoria segura a la herramienta, es una sujeción rígida y estable; para que esto se logre la sujeción no va a realizar de la forma común de apretar las mordazas alrededor del material en bruto si no que se realizara un mecanizado especial para que su sujeción sea desde el interior del material en bruto, esto con el fin de que en los movimientos en vacío la herramienta no colisione con las mordazas de la copa. Para lograr el tipo de sujeción propuesta es necesario planificar un mecanizado para ajustar el material y poder montarlo de tal manera; es por esto que se planificó un mecanizado de ajuste donde se realizara la cavidad en la que entran las mordazas.

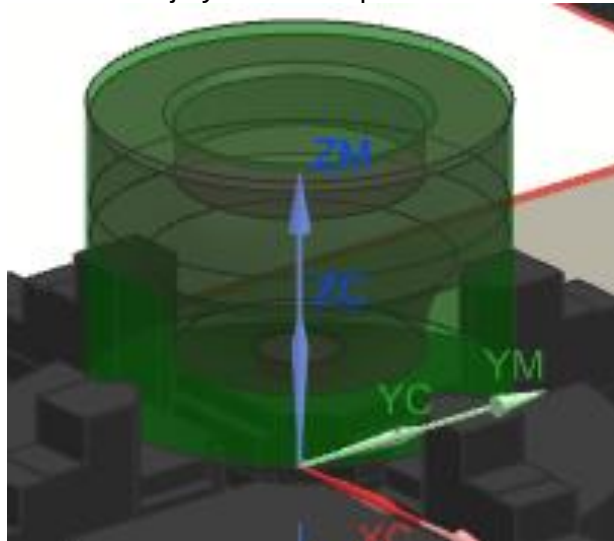
Ilustración 85. Tipo de montaje propuesto para la mecanización del impeller



Fuente: Autor

Para realizar el ajuste de mecanizado se tuvo en cuenta el material en bruto, la cavidad diseñada y las herramientas a emplear, se planifico su secuencia de operación y simulación en el CNC virtual para realizar su fabricación; para esto se tomó las medidas de la copa y las mordazas para el diseño de la cavidad que se realizó en 3 operaciones.

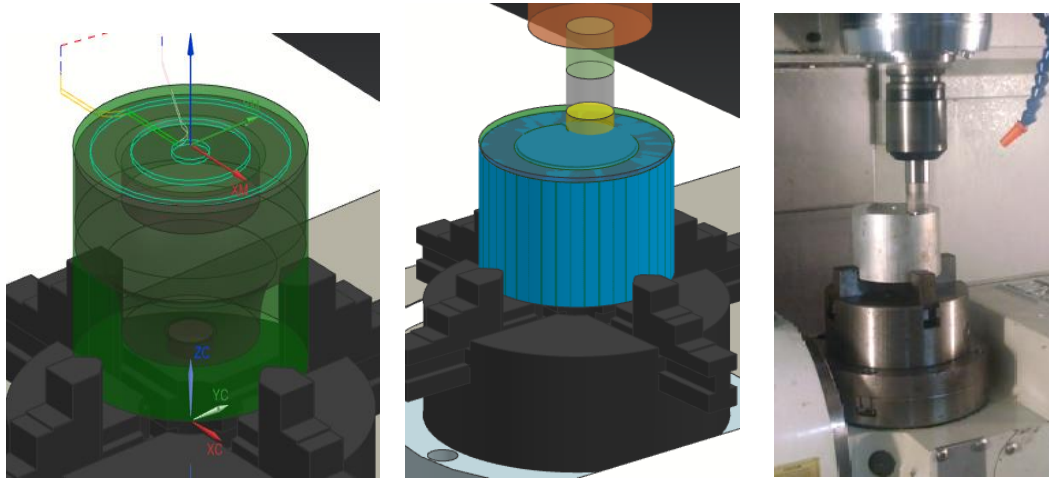
Ilustración 86. Montaje y ensamble para el mecanizado de ajuste



Fuente: Autor

La primera operación que se realizó fue un planeado con la operación “*FACE_MILLING*”, sobre la cara inferior de lo que será el *impeller* esto con el fin de quitar la cara inclinada causada por el corte del material en bruto; la herramienta usada fue la (KORLOY AMS2025HS) con inserto (APXT 11T3PDSR-MM_PC3545).

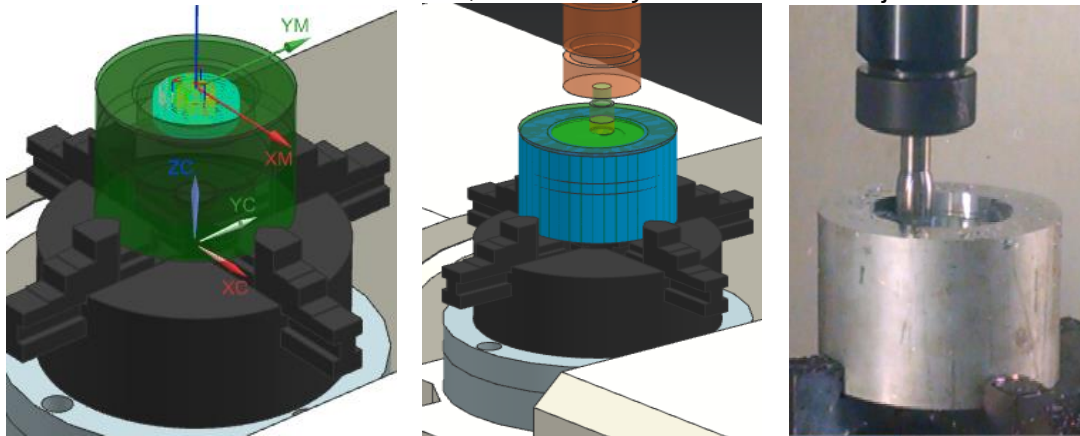
Ilustración 87. Diseño, simulación y fabricación del planeado para ajuste del material



Fuente: Autor

La segunda operación que se realizó fue la operación de cajeado con la operación “*PLANAR_MILL*” en esta operación se fabricó la cavidad a una profundidad de 15 mm que es la altura de la cara más alta de las mordazas; la herramienta que se empleó fue la MEC16-S12-11T con inserto (BDMT11T308ER-JT).

Ilustración 88. Diseño, simulación y fabricación del cajeado

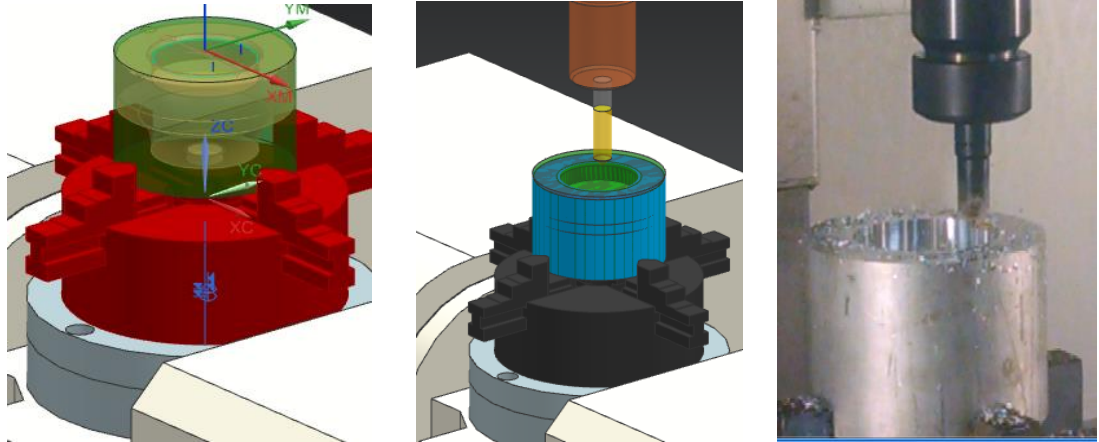


Fuente: Autor

La tercera operación para finalizar el ajuste para el montaje definitivo es el avellanado con la operación “*PLANAR_MILL*”; este avellanado se realizó para que

cuando se posicione el *impeller* no presente problemas de deformación del material. Esta operación se realizó con la herramienta (NINE 9) con inserto (NC40).

Ilustración 89. Diseño, simulación y fabricación del avellanado para el ajuste del material



Con el procedimiento de operaciones anterior se realizó el ajuste para poder montar el material como ya se estableció, en la siguiente tabla se encuentra algunos parámetros de corte y variables de proceso.

Tabla 22. Parámetros de corte del mecanizado ajuste

Operación	Útil	f [mm/diente]	V_c [m/min]	A_p [mm]	Rpm	t [min]
planeado		0.1	400	2	5093	0:51
cajeado	MEC16-S12-11T	0.06	500	2	9947	4:15
avellanado	NINE 9	0.05	263	-3	6000	0:22

Fuente: Autor

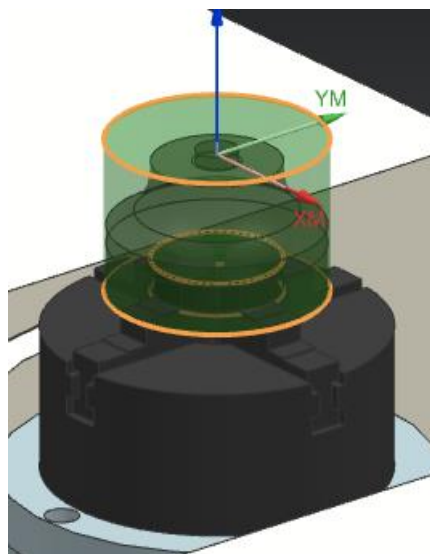
6.3 Desarrollo de las estrategias de manufactura del “PRE-MAQUINADO” del *impeller*

Luego de haber realizado el diseño dimensional, modelado CAD y el diseño del montaje el paso a seguir es generar las estrategias de mecanizado para el tallado de los álabes del *impeller*; para generar las estrategias es necesario tener en cuenta la capacidad tecnológica del CNC de la Universidad Santo Tomas y las herramientas en el inventario, con la información que se recopiló se ideó las estrategias para poder seleccionar las operaciones que el software NX CAM ofrece en el módulo multieje para poder fabricar el *impeller*.

Una de las variables principales que se tuvo en cuenta fue la limitación tecnológica de CNC que cuenta con 4+1 ejes; es decir que no puede operar los 5 ejes simultáneamente, en consecuencia, por esta limitante la complejidad de las operaciones es limitada es decir que algunas geometrías complejas no se pueden fabricar por que necesariamente se requiere el uso de 5 ejes. Otras de las limitantes es el espacio de trabajo por lo que se debe considerar unas dimensiones medianas para el *impeller*.

La primera parte de la estrategia fue diseñar un desbaste que lleve a una aproximación o pre desbaste, para que mediante de esta estrategia se tuviera el acabado final de la parte externa de los álabes y a la vez la herramienta que va a realizar el tallado de los álabes tenga que cortar menos material; esta estrategia que nombramos “PRE_MAQUINADO” se van a utilizar diferentes operaciones para llevar el material a la forma aproximada como se muestra en la ilustración 68.

Ilustración 90. Ensamble del material pre maquinado.

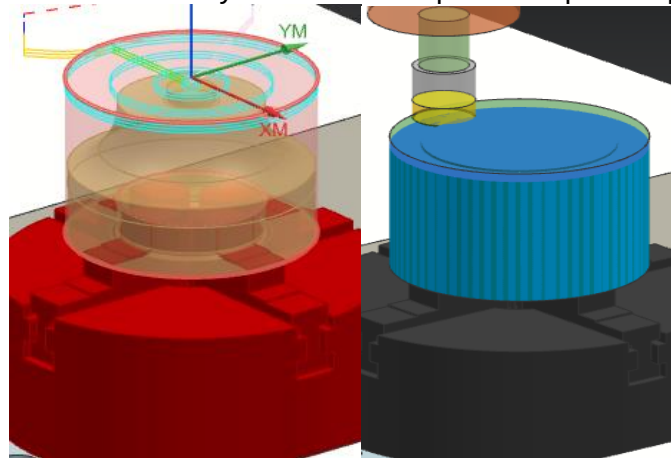


Fuente: Autor

Lo primero que se realizó fue platear que operaciones se realizarían para hacer el devaste de forma óptima y también que operación usar para dejar un buen acabado superficial; de acuerdo a la geometría del *impeller* este tiene como característica en la parte superior un agujero de eje, una superficie cilíndrica con un avellan; con estas características se diseñó una preforma cilíndrica que su superficie es la revolución de la cara superior del álabe del *impeller*. Con estas características principales se platearon 4 operaciones que se describirán a continuación:

La primera operación que se realizó fue un planeado con la operación “*FACE_MILLING*”, sobre la cara superior del el *impeller* esto con el fin de quitar la cara inclinada causada por el corte del material en bruto; la herramienta usada fue la (KORLOY AMS2025HS) con inserto (APXT 11T3PDSR-MM_PC3545).

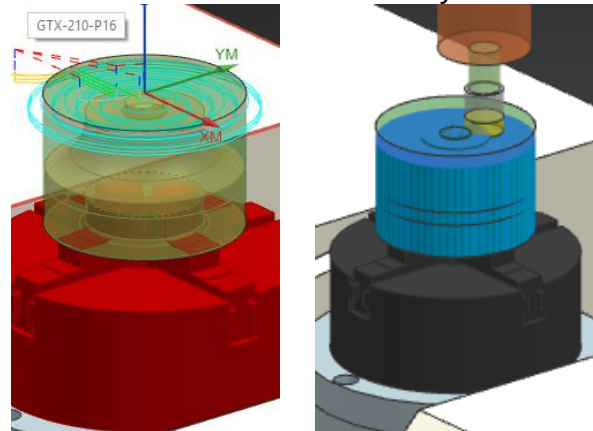
Ilustración 91. Diseño y simulación del planeado pre-maquinado



Fuente: Autor

La segunda operación que se realizó fue un contorneado para realizar la geometría cilíndrica hecha con la operación “*PLANAR_MILL*”, este cilindro que forma parte del cubo del *impeller* tiene una altura de 5.5 mm; la herramienta empleada fue la (KORLOY AMS2025HS) con inserto (APXT 11T3PDSR-MM_PC3545) y se tomó un A_p de 2 mm.

Ilustración 92. Diseño y simulación del cilindro

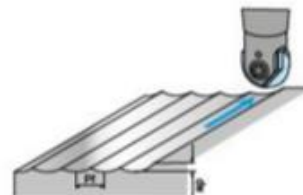


Fuente: Autor

La tercera y la cuarta operación planteada fueron analizadas de una manera particular por el tipo de geometría la cual se va a fabricar por tal motivo estas operaciones están enlazadas; como la superficie final es de forma cilíndrica NX ofrece una operación especial para acabados de forma cilíndrica llamada “ROTARY_FLOOR” explicada en la sección 6.8.1 con esta operación garantizamos un buen acabado superficial. La tercera operación se realizó un contornó con la herramienta (KORLOY AMS2025HS) dejando un sobre material de 0.3 mm y escalones de 0.5 mm; estos criterios fueron establecidos para la utilización de una herramienta de punta redonda (KYOCERA MRF 16-S20) que dentro de sus parámetros de corte tiene un a profundidad de corte (a_p) de 0.5 mm. Por tanto la operación 3 es crítica para para que la herramienta circular trabaje en condiciones óptimas.

Ilustración 93. Algunas condiciones de corte de la herramienta KYOCERA MRF 16-S20

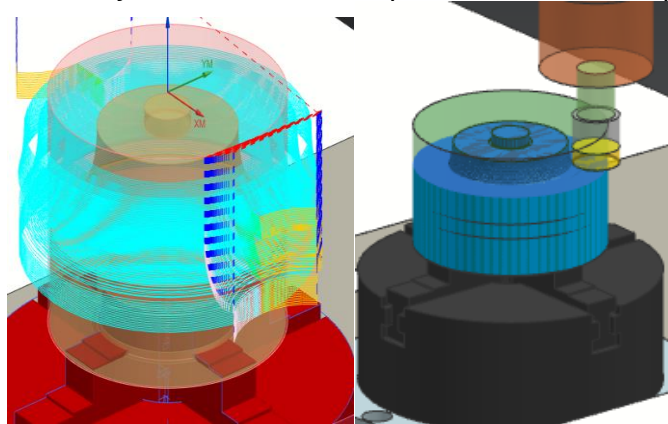
Description	Depth of Cut (mm)		Applications
	a_p	Pf	
Standard Neck	MRF08-S12	0.2(Max0.3)	0.8
	MRF10-S12	0.2	1
	MRF12-S12	0.5	1.2
	MRF16-S20	0.5	1.6
	MRF20-S25	1	2
	MRF25-S32	1	2.5
Long Neck	MRF08-S12-130	0.2(Max0.3)	0.8
	MRF10-S12-150	0.2	1
	MRF12-S12-160	0.5	1.2
	MRF16-S20-160	0.5	1.6
	MRF20-S25-180	1	2
	MRF25-S32-200	1	2.5



Fuente: Kyocera milling tools

La tercera operación que ya se describió fue realizada con la operación “MILLIN_CONTOUR” y la herramienta empleada fue la (KORLOY AMS2025HS) con inserto (APXT 11T3PDSR-MM_PC3545).

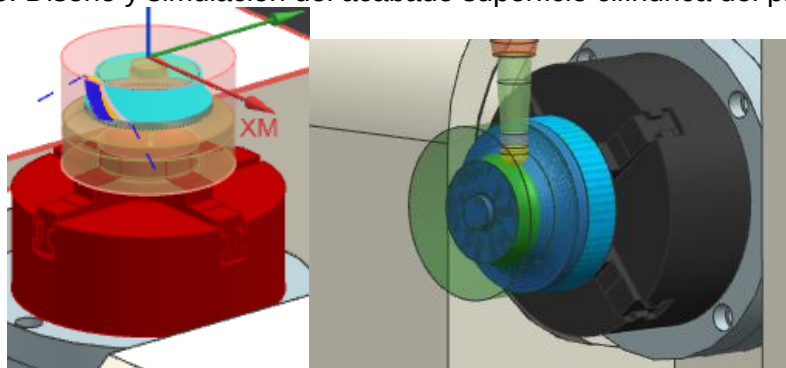
Ilustración 94. Diseño y simulación de la superficie cilíndrica del pre maquinado



Fuente: Autor

La cuarta operación que se realizó fue la del acabado con la operación “ROTARY_FLOOR” con la herramienta (KYOCERA MRF 16-S20) e inserto (RDF16FR-PR915).

Ilustración 95. Diseño y simulación del acabado superficie cilíndrica del pre maquinado.

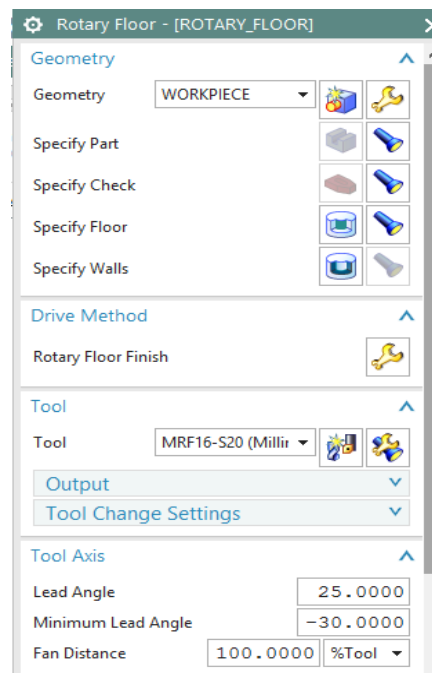


Fuente: Autor.

Para poder programar la operación “ROTARY_FLOOR” que emplea el uso del cuarto eje principalmente se requiere seleccionar algunas de las variables que trae

el cuadro de dialogo en el módulo de manufactura NX como se muestra en la ilustración 74, alguna de estas variable dependen del tipo de estrategia que se quiera definir y la herramienta a emplear; en este caso particular se seleccionó la opción “*Specify Floor*” debido al tipo de geometría no hay una pared por tanto la opción “*Specify Walls*” se encuentra vacía; dentro de la opción “*Rotary Floor Finish*” Se encuentra otro cuadro dialogo donde esta las variables más importantes para generar la operación como se puede ver la ilustración 75.

Ilustración 96. Cuadro de dialogo de la operación “ROTARY_FLOOR”

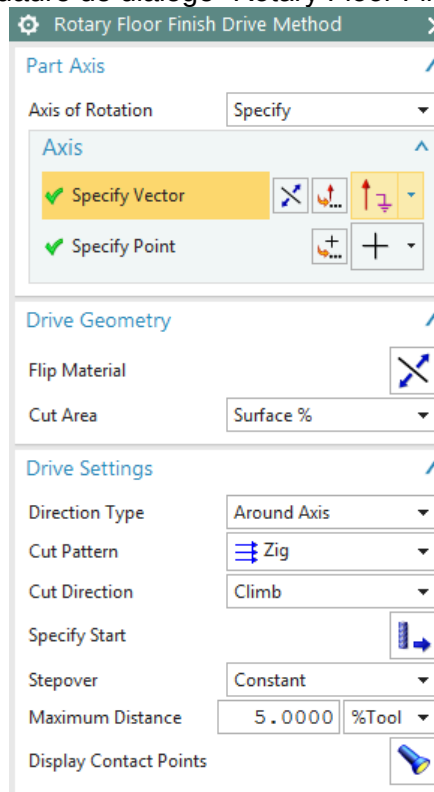


Fuente: Autor

En el cuadro de diálogo “*Rotary Floor Finish Drive Method*” seleccionamos las siguientes variables; la opción “*Axis Rotation*” seleccionamos el eje Z de la pieza de trabajo, que es donde la pieza va a rotar alrededor de este eje. En la opción “*Cut Area*” seleccionamos la opción “*Surface %*” que especifica los valores porcentuales positivos o negativos para el inicio y el final de la primera pasada, el inicio y el final de la última pasada, la primera pasada, y la última pasada; para determinar la cantidad de unidad área de la superficie a utilizar que es nuestro caso es del 100%. En la opción “*Direction Type*” seleccionamos si la trayectoria de corte sea alrededor del eje o a lo largo del eje para nuestro caso seleccionamos “*Around of Axis*”. En la siguiente opción “*Cut Patter*” solucionamos el tipo de trayectoria que fue Zig para que el corte fuera más uniforme y dejara un acabado superficial mejor, la siguiente opción “*Cut Direction*” que es la dirección de corte que por lo general se selecciona “*Climb*” que especifica que con un giro del cabezal hacia la derecha el material siempre está en el lado derecho de la herramienta mientras corta. Por ultimo de este cuadro de dialogo la opción “*Stepover*” que es la pasada de la herramienta, para

que la pieza de trabajo tenga un buen acabado superficial se decidió que la pasada fuera constante a lo largo de la trayectoria y que corte con un 5% de esta para que la pasada fuera más fina. Por ultimo para generar la operación en el cuadro de dialogo “ROTARY_FLOOR” ilustración 74, en la opción “Tool Axis” se secciona a que Angulo la herramienta debe cortar es decir si se posiciona 90° encima de la pieza de trabajo o 25° para nuestro caso, con esto garantizamos que la herramienta este cortando con el filo de corte y no con el mango. Con estas opciones que se especificaron se generó la operación como se muestra en la ilustración 73.

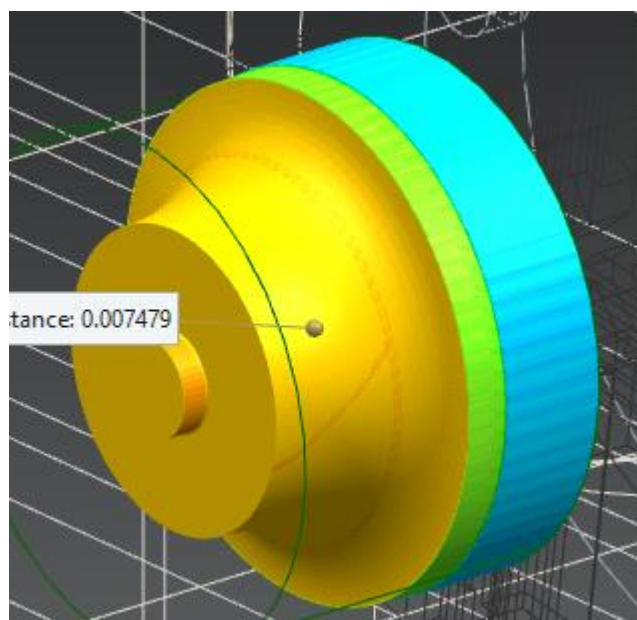
Ilustración 97. Cuadro de dialogo “Rotary Floor Finish Drive Method”



Fuente: Autor

Con las operaciones anteriormente narradas se logró que esta fase de manufactura de pre maquinado del *impeller* se tuviera un buen acabado superficial como se planteó en la estrategia inicial; en la ilustración 78 se puede ver mediante el análisis de superficie de NX la calidad del acabado con algunas medidas de las crestas o valles en la superficie de la geometría cilíndrica, por tanto, se puede concluir que la operaciones llevadas a cabo dieron un excelente resultado en la planeación y ejecución.

Ilustración 98. Análisis virtual de NX en la superficie de la geometría de “PRE_MQUINADO”



Fuente: Autor

En la siguiente tabla se encuentran las variables de corte que fueron empleadas para la manufactura del PRE-MAQUINADO.

Tabla 23. Parámetros de corte del mecanizado del PRE-MAQUINADO

Operación	Útil	f [mm/diente]	V_c [m/min]	A_p [mm]	Rpm	t[min]
planeado	KORLOY AMS2025HS	0.1	4500	2	6366	1:19
Contorno del cilindro	KORLOY AMS2025HS	0.1	500	2	6366	2:19
Contorno desbaste	KORLOY AMS2025HS	0.1	500	0.5	6366	41:24
Contorno acabado	KYOCERA MRF 16-S20	0.05	300	0	5968	24:23

Fuente: Autor

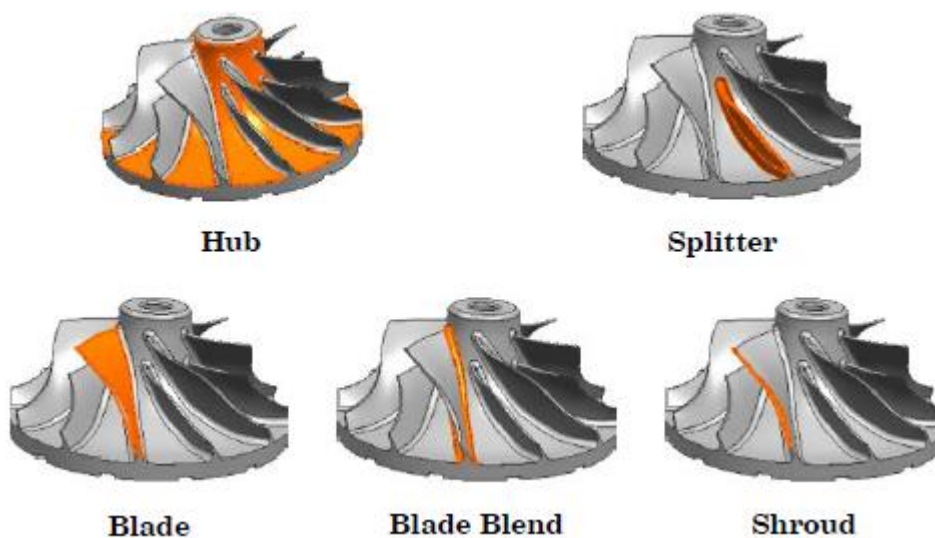
6.4 Desarrollo de las estrategias de manufactura par el tallado de los álabes del *impeller*.

Para terminar con la estrategia de la fabricación de *impeller*, se determinó unos pasos anteriores de la estrategia, en estos se identificaron algunas limitaciones del CNC de la Universidad Santo Tomas; para hacer frente a esta limitaciones se plantearon algunas estrategias como la del mecanizado ajuste y la de pre-maquinado Que solucionan los problemas encontrados como el tipo de montaje y limitación de espacio. Con los pasos anteriores finalizado se procedió a plantear estrategias para el mecanizado de los alabes; es de gran relevancia tener en cuenta la limitación de 4+1 para efectuar la programación del mecanizado.

Lo primero que analizamos del software NX en su módulo CAM es que tipo de operaciones multieje que ofrece el programa, en la sección 6.8.1 esta descrito las diferentes opciones para mecanizado multieje o de variación del eje de la herramienta. Dentro de estas opciones NX ofrece un módulo especializado para el mecanizado de este tipo de elemento, la opción llamada “*mill_multi_blade*” explicada en la sección 6.8.1. Es una herramienta de fácil manejo para la fabricación de *impellers* y se programa de la siguiente manera.

Lo primero que se debe crear es una geometría llamada “MULTI_BLADE_GEOM” que es una matriz para definir el eje de rotación y las partes geométricas del *impeller* para su posterior mecanizado. En la ilustración 77 se puede ver las partes de la geometría que se deben seleccionar.

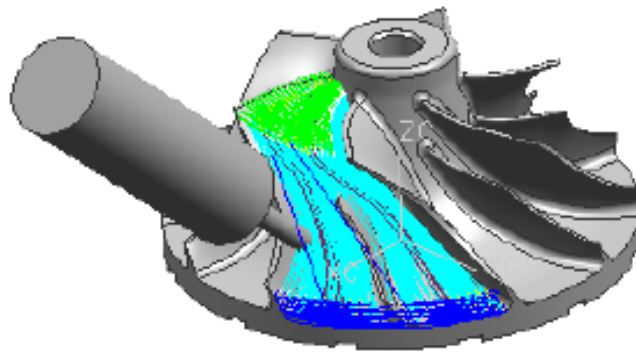
Ilustración 99. Partes del *impeller* reconocidas por NX



Fuente: NX

Luego de seleccionar la geometría ya el software reconoce la geometría y mediante las operaciones presentes en el módulo de “*mil_multi_blade*” que sirven para un tipo de mecanizado como desbaste y acabados; por ejemplo la opción “MULTI_BLADE_ROUGH” con esta opción nos permiten generar la estrategia para el desbaste además de ofrecer la opción de dar pasadas; sin embargo este módulo presenta un problema en cuanto a la limitante de la máquina CNC de la Universidad Santo Tomás no permite la opción de variar o limitar la herramienta a movimientos de 4 ejes por lo que no es posible emplear este módulo para la manufactura de este proyecto.

Ilustración 100. Simulación de la operación “MULTI_BLADE_ROUGH” con un impeller con álabes intermedios.

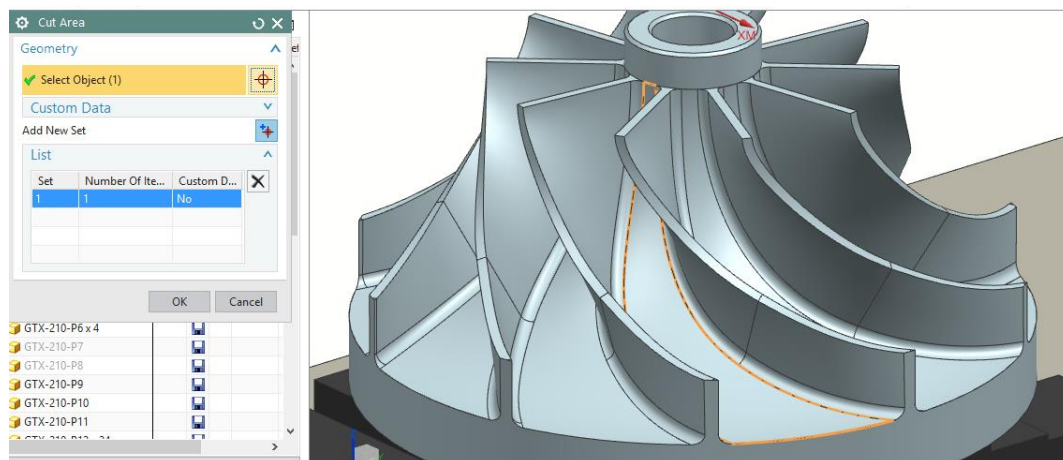


Fuente: NX

Otra de las opciones disponible para la manufactura del impeller está en la opción de “*VARIABLE_CONTOUR*”; como se explicó en la sección 6.8.1 esta tiene la facilidad de limitar los ejes de movimiento es decir que deja alguno de los ejes fijo, en consecuencia, esta opción permite configurar la programación para trabajar en 3 ejes, 4 ejes o 5 ejes. Se procede a programar la operación como esta descrito en el cuadro de dialogo de la ilustración 37. Se estableció que la herramienta de corte debía tener unas características muy importantes para este tipo de mecanizado; una de estas es que sea de punta redonda que tiene un comportamiento mejor cuando cortan en superficies curvas, además esta herramienta debe ser lo más larga debido a que herramienta se va adentrando cada vez más en las operaciones de desbaste esto puede causar una colisión entre el impeller y el cono de la herramienta y ser perjudicial para la máquina; en el inventario de herramientas tomamos la herramienta YG G9249012 para simular virtualmente las operaciones a programar. Los pasos para programar esta operación son los siguientes:

1. Se selecciona el “*Specify Cut Area*” que es área de corte de la operación

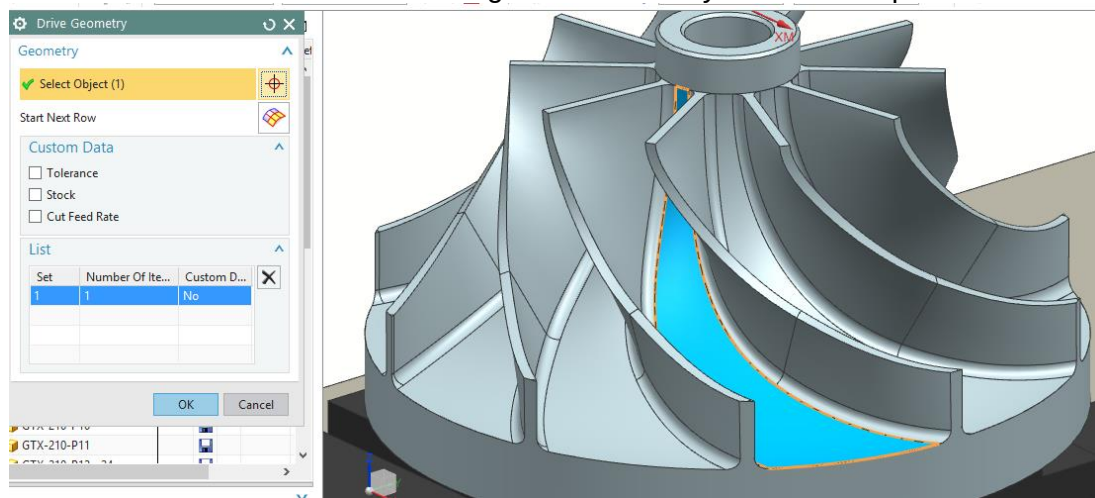
Ilustración 101. Selección del “Specify Cut Area” de la geometría del impeller



Fuente: Autor

2. Luego seleccionamos en “*Drive Method*” la opción de “*Surface Area*” en este cuadro de dialogo debemos seleccionar la “*Specify Drive Geometry*”

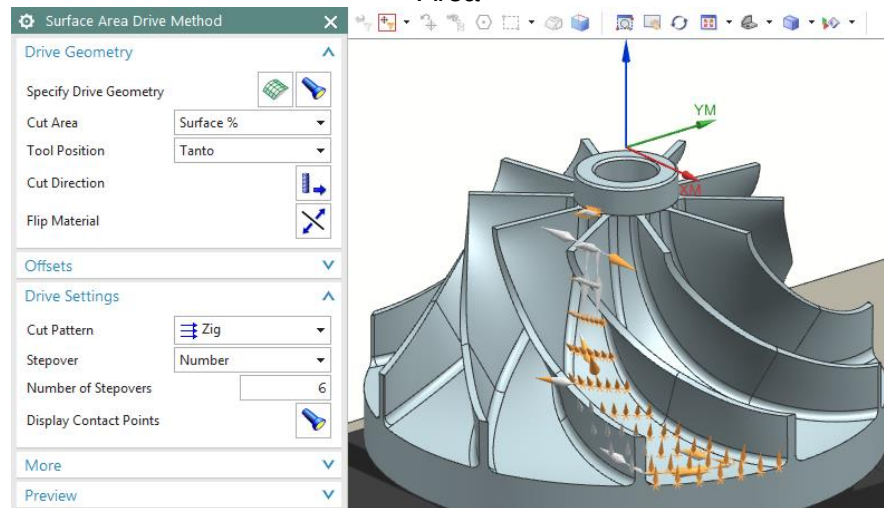
Ilustración 102. Selección de geometría de trayectoria del impeller



Fuente: Autor

3. En el cuadro de dialogo de "Surface Area" especificamos la dirección de corte, el modo de corte y el número de pasadas de la herramienta a lo ancho de la trayectoria de la geometría; estas pasadas depende de acuerdo a los parámetros sugeridos del fabricante para nuestro caso es $0.2 \times \text{diámetro} \times \text{ancho de la geometría}$ pero esto no es necesario en esta operación porque es un devaste y no es crítico en esta operación el tipo de acabado.
- 4.

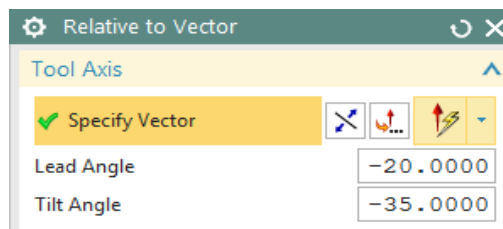
Ilustración 103. Selección de variables en la operación en el cuadro de dialogo "Surface Area"



Fuente: Autor

5. luego en el cuadro de dialogo de "VARIABLE_CONTOUR" seleccionamos en la opción "Projection Vector" la opción "Normal to drive" anteriormente explicada, ahora seleccionamos dentro de la opción "Tool axis" la opción "Relative to Vector" como se explicó en la sección 6.8.1 es donde se digitan lo valores de los ángulos para modificar el eje de la herramienta, en esta opción debemos digitar los ángulos "Lead and Tilt"

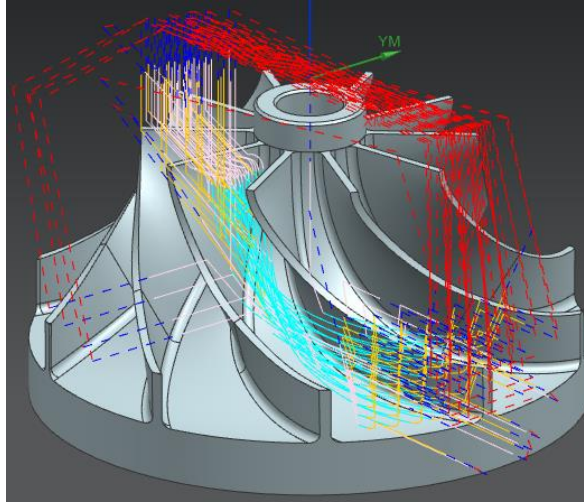
Ilustración 104. Cuadro de dialogo de la opción "Relative to Vector"



Fuente: Autor

6. los últimos pasos para programar esta operación son el número de pasas en profundidad es decir el ap y ajustar los movimientos en vacío; para ajustar el número de pasadas para dar la profundidad de corte es la opción "*Cutting Parameters*" y en la pestaña "*Multiple Passes*" digitamos la distancia de la profundidad de corte y el ap de la herramienta. Como la altura de los álabes no es constante digitamos la mayor que es de 20. Con eso generamos la operación.

Ilustración 105. Resultado de la estrategia de la operación "VARIABLE_CONTOUR"



Fuente: Autor

Sin embargo, la anterior estrategia presenta varios errores que se pudieron ver en la simulación avanzada y fueron los siguientes:

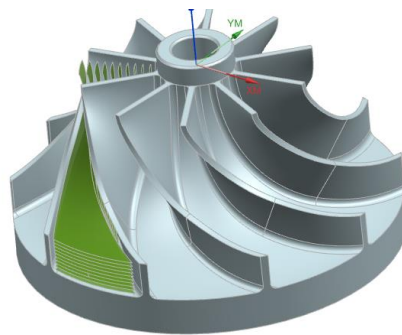
- la herramienta en su trayectoria corta más profundo en algunos lugares y en otros no hace contacto
- el sobre material que deja la operación es demasiado alto para realizar una operación de acabado eficiente
- en la simulación avanzada por medio de la máquina virtual presento varias colisiones

En consecuencia, se debió establecer una nueva estrategia de maquinado que solucione estos graves problemas de manufactura y realicen el proceso eficientemente; se consideró efectuar la manufactura en 3 ejes pero se descartó inmediatamente por que no hay forma de efectuar un maquinado de 3 ejes en una geometría compleja de forma eficiente; también se consideró el cambio de estrategia pero esta opción no es viable, debido a la limitante del CNC de la Universidad Santo Tomás de ser de 4+1 ejes, este es el único módulo de manufactura de NX que nos permite trabajar con esta configuración que no la permite otro tipo de operaciones, por tanto, se decidió realizar la manufactura por partes es decir hacer operaciones individuales de desbaste y acabado por pasos o

sesiones de área. Se decidió dividir las operaciones entre álabe derecho y álabe para poder programar la opción “VARIABLE_CONTOUR” de mejor manera y no presentar los problemas de manufactura anteriormente descritos.

La primera estrategia para resolver el problema del corte inicial en donde la herramienta no corta uniformemente en el recorrido de la trayectoria causando que no corte en algunos lugares, fue una proyección de planos desde el fondo de la geometría del *impeller*, con esto se garantiza que el corte sea uniforme en las pasadas iniciales. En la ilustración 84 se muestra los planos proyectados cada uno a una distancia de 2 mm realizados con la opción “*Variable Offset Sheet*”.

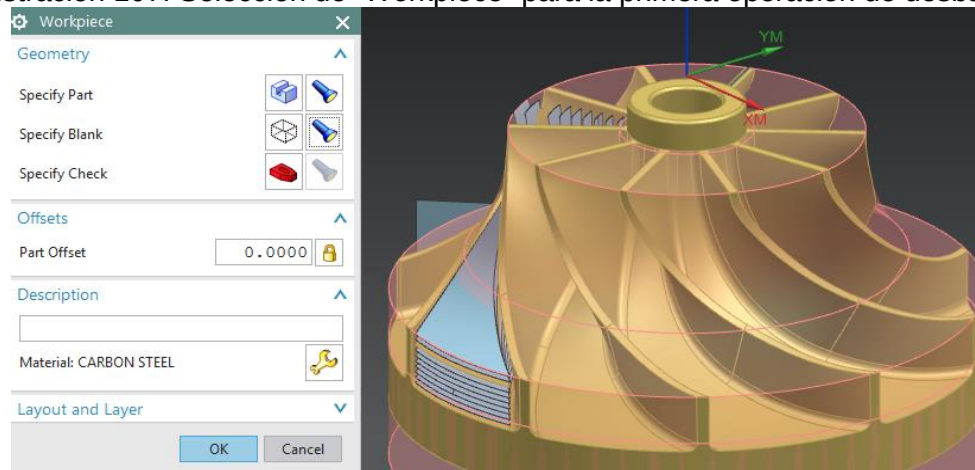
Ilustración 106. Planos proyectados para ser usados de base en la manufactura del *impeller*



Fuente: Autor

Para comenzar con los primeros desbaste es necesario utilizar los planos que creamos anteriormente por es necesario crear un nuevo “*Workpiece*” para que el programa reconozca esta geometría, luego de esto se precedió a programar las 2 primeras operaciones de desbaste individuales con ciertas características.

Ilustración 107. Selección de “*Workpiece*” para la primera operación de desbaste



Fuente: Autor

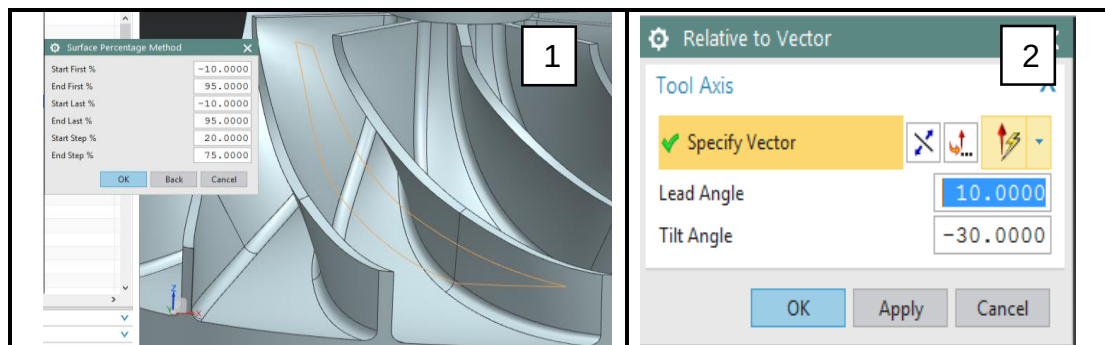
Para comenzar a programar las operaciones bajo la opción “*VARIABLE_CONTOUR*” se deben seguir algunas condiciones para seguir con la estrategia de hacer las operaciones por pasos y corregir los errores encontrados en la primera operación; los cambios en la forma de llenar y seleccionar las variables en el cuadro de diálogo de la operación son fundamentales para genera la estrategia espera, esta estrategia la llamamos estrategia general para el devaste, los pasos son los siguientes:

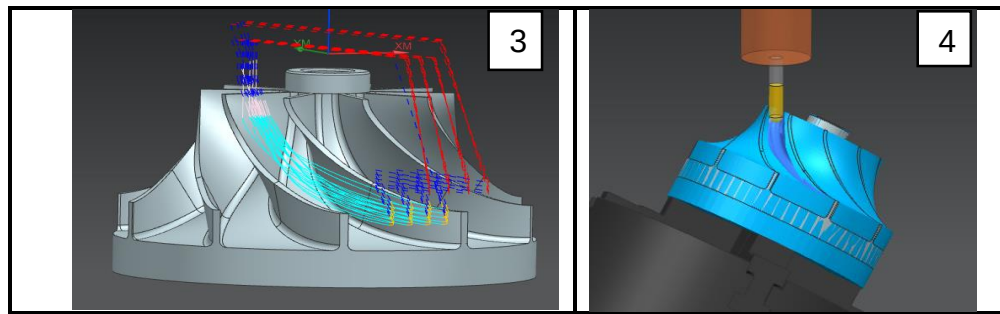
- Se debe cambiar en el cuadro de dialogo de “*Surface Area*” en la opción “*cut area*” el porcentaje de área para hacer el mecanizado por partes.
- Reducir el número de pasadas de la herramienta
- Establecer los valores de ángulos en la opción “*Tool axis*” la opción “*Relative to Vector*” debido a que para cada área los ángulos de la herramienta son diferentes en cada operación

El resto de las demás variable que el usuario debe llenar se mantiene por que con esa configuración garantizamos un mecanizado 4+1 ejes.

Se comienza a programar la primera operación de debate mediante la opción “*VARIABLE_CONTOUR*” siguiendo los anteriores lineamientos de programación dado un numero de 3 pasadas a lo largo del área seleccionada y una profundidad de 5.5 con un ap de 1.2. En las siguientes imágenes se muestra los resultados de esta estrategia.

Ilustración 108. (1) Área de corte (2) ángulos “Lead and Tilt” (3) resultado de la trayectoria (4) Simulación de la Operación desbaste 1 superficial

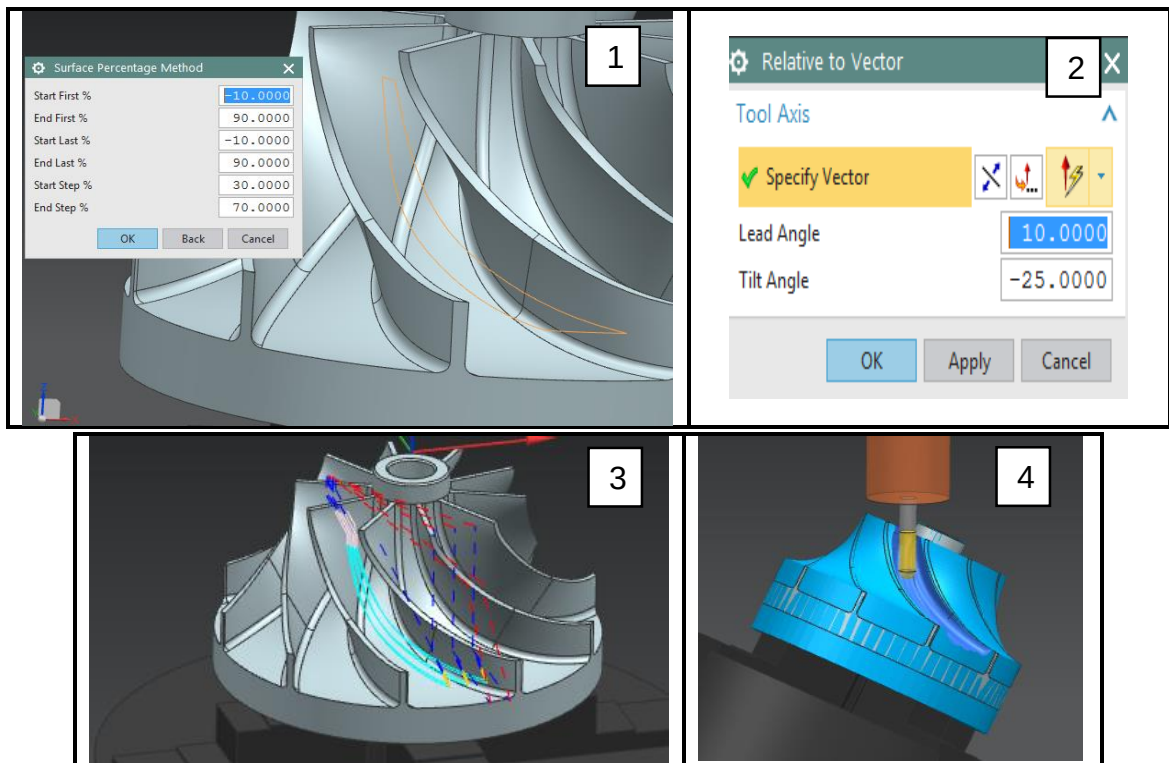




Fuente: Autor

La siguiente operación fue seguir con el devaste esta vez completado el área de corte en la parte superior, se sigue los lineamientos propuesto en la estrategia general para el desbaste.

Ilustración 109. (1) Área de corte (2) ángulos “Lead and Tilt” (3) resultado de la trayectoria (4) Simulación de la Operación desbaste 2 superficial

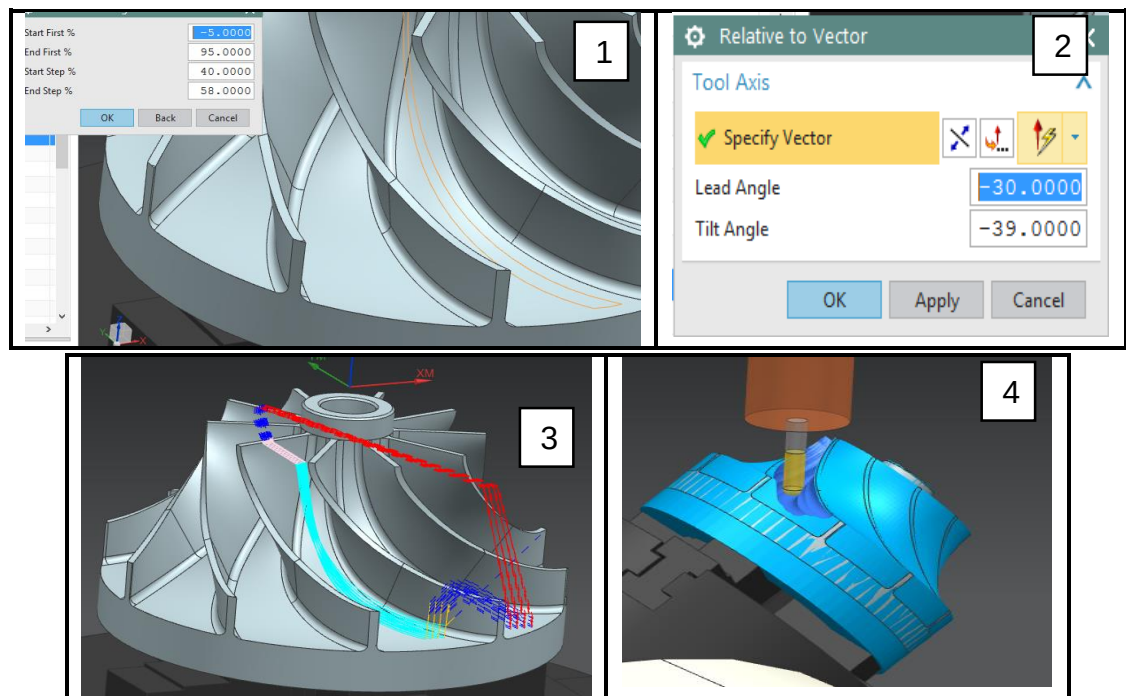


Fuente: Autor

La tercera operación fue realizar un devaste por todo el centro de la cavidad; se tomó esta decisión debido a la alta probabilidad de colisión de la herramienta si

tomamos toda el área de corte además el software genera una trayectorias incompletas ocasionadas por el ángulo de la herramienta una limitación de programar con 4 ejes debido a que la trayectoria no es constante si no que sigue la curva del álabe que no es una curva constate; la herramienta debe llegar a una profundidad de 4 mm con un ap de 0.9 mm. En la siguiente ilustración se ve el resultado de la estrategia.

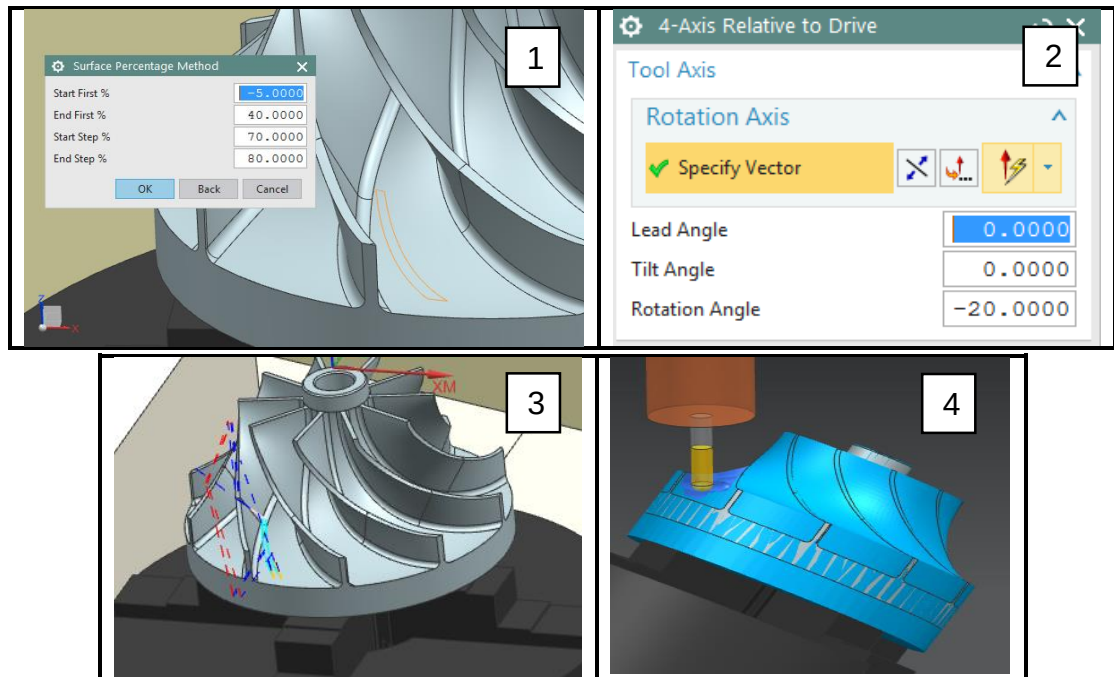
Ilustración 110. (1) Área de corte (2) ángulos “Lead and Tilt” (3) resultado de la trayectoria (4) Simulación de la Operación desbaste 3 central



Fuente: Autor

En la cuarta operación se realizó un devaste lateral a la parte izquierda de la cavidad, como se poder ver la ilustración 88 imagen (4) hay demasiado sobre material cerca de los álbes en la parte inferior por esto es necesario realizar esta operación.

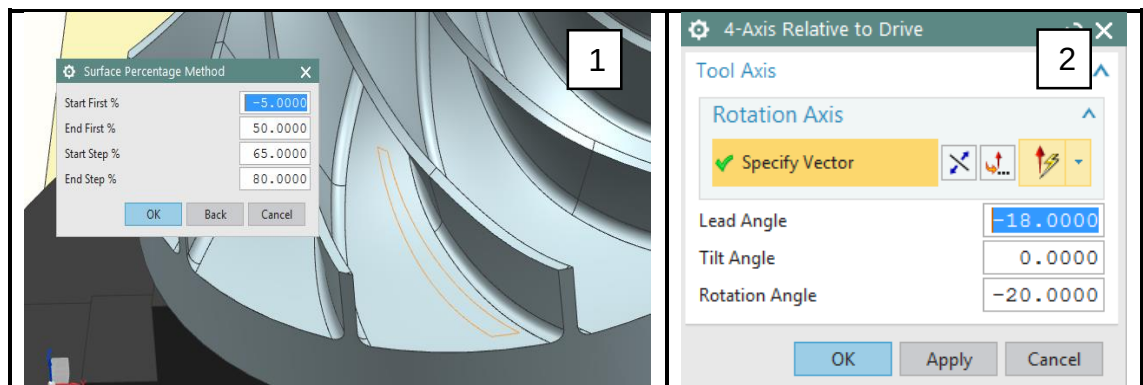
Ilustración 111. (1) Área de corte (2) ángulos “Lead and Tilt” (3) resultado de la trayectoria (4) Simulación de la Operación desbaste 4 lateral izquierdo

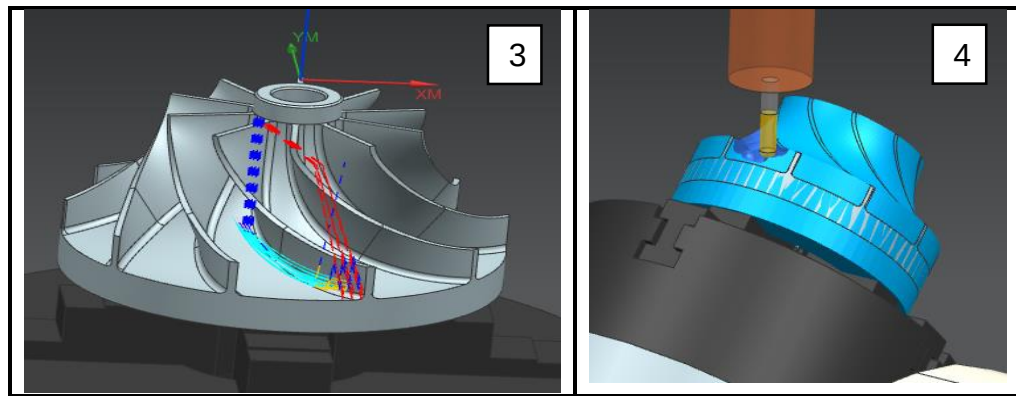


Fuente: Autor

La quinta operación se empleó una estrategia similar a la anterior para la parte lateral derecha inferior como se muestra en la parte inferior.

Ilustración 112. (1) Área de corte (2) ángulos “Lead and Tilt” (3) resultado de la trayectoria (4) Simulación de la Operación desbaste 5 lateral derecha.

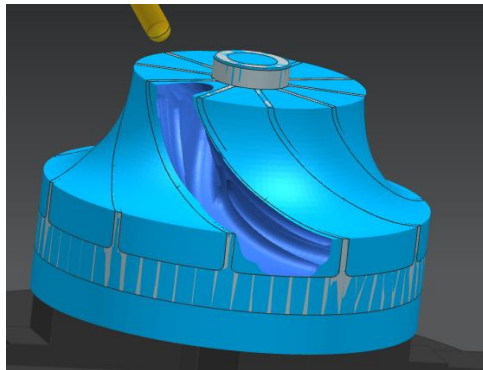




Fuente: Autor

Como resultado de la estrategia general para el devaste se trazó unos lineamientos que dieron como resultado un devaste de mejor calidad comparado con la estrategia inicial; este devaste que consta de 5 operaciones pudo realizar la operaciones en zonas más internas de la cavidad dejando menos sobre material para realizar las operaciones de acabado. Se pudieron comparar resultados mediante la simulación virtual en el software NX con la máquina virtual.

Ilustración 113. Resultados del desbaste por medio de la simulación avanzada simulación avanzada IS&V



Fuente: Autor

El paso a seguir con el plan de manufactura del *impeller* es plantear la estrategia para el acabado, el primer paso es establecer la herramienta para hacer las operaciones y como característica principal para la selección sea que posea un mago largo y sea de punta esférica; en el inventariado de herramientas de la Universidad Santo Tomas se encontró varias con puntas redondas pero específicamente se requiere de una que tenga 3 mm de diámetro debido a la geometría del *impeller* que tiene un redondeo que se encuentra entre el fondo del *impeller* y los álabes, por esto se seleccionó la herramienta punta redonda HGT BLM0306 que cumple con las características, sin embargo, posee otra característica

y es un aumento del diámetro a 6 mm en el mago esto le permite a la herramienta tener mayor rigidez en las operaciones de corte.



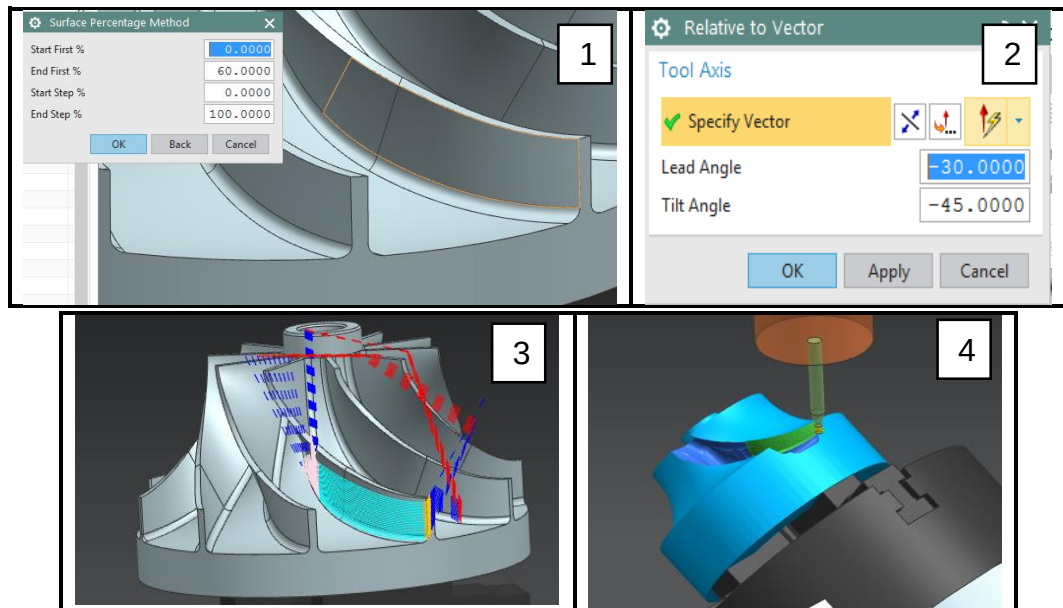
Fuente: catalogo HGT

Definida la herramienta se debe trazar una estrategia que pueda realizar el acabado de forma eficiente con la operación “*VARIABLE_CONTOUR*”, como no es posible realizar el mecanizado completo de la superficie geometría si no se realiza por partes debido a las limitantes ya mencionadas se decide realizar la misma estrategia anteriormente usada para el devaste, se decidió dividir las operaciones entre las 2 caras de la cavidad para facilitar la programación de la operación y que sea más eficiente generando las trayectorias correctamente.

Comenzamos a programar la primera operación de desbaste en la parte inferior derecha del *impeller*, seguimos con la programación habitual es decir solo haciendo cambios en el porcentaje de área de corte y los ángulos de la herramienta. El número de pasadas en esta operación de acabado depende del máximo recomendado por el fabricante de la herramienta, el paso⁸ recomendado por el fabricante es de $0.03 \times \text{radio}$ que da 0.45 mm de paso, con esta medida dividimos la medida del ancho de la cara y nos da el número de alrededor 20 pasadas. En la siguiente ilustración se ve la estrategia utilizada.

⁸ El paso de la herramienta es la distancia máxima recomendada que hay entre cada pasada de corte.

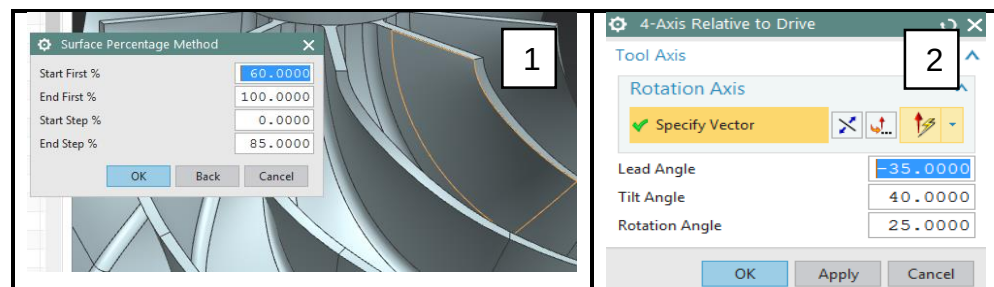
Ilustración 115. (1) Área de corte (2) ángulos “Lead and Tilt” (3) resultado de la trayectoria (5) Simulación de la primera operación de acabado

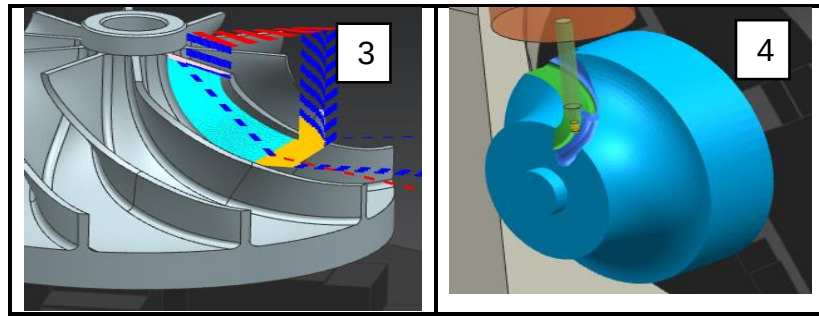


Fuente: Autor

La segunda operación es realizar el acabado para la parte superior derecha de álabe, de acuerdo con la estrategia y el paso de la herramienta el numero de pasadas en esta parte del alabe es de 40. En la siguiente ilustración se ve el resultado de la estrategia.

Ilustración 116. (1) Área de corte (2) ángulos “Lead and Tilt” (3) resultado de la trayectoria (1) Simulación de la operación en la parte superior del álabe

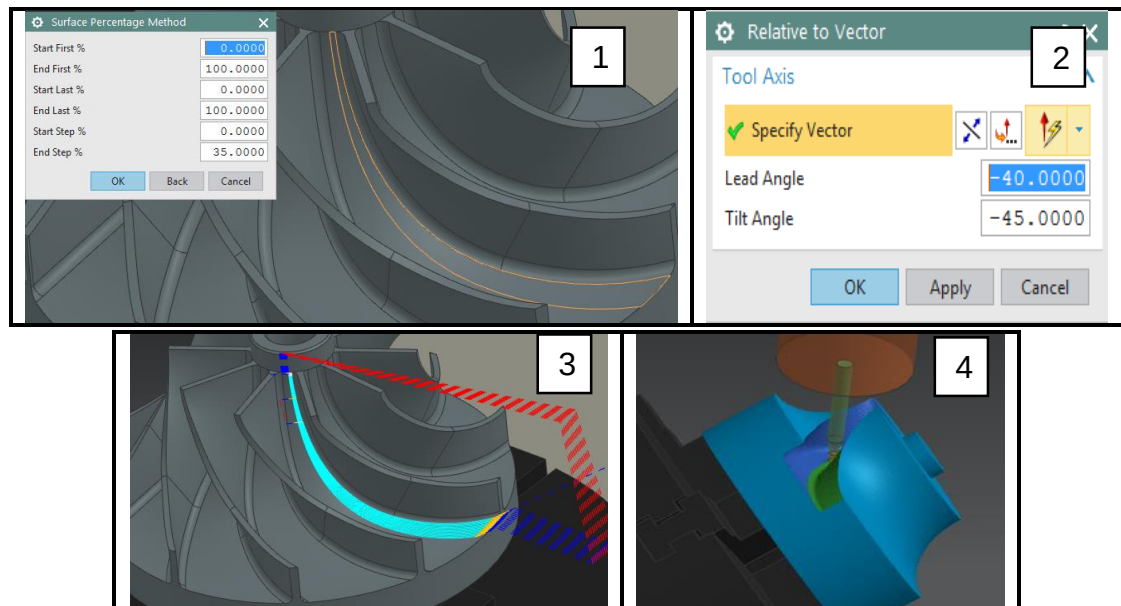




Fuente: Autor

La tercera operación planteada fue realizar la parte del fondo pero debido a las ya mencionadas limitaciones solo se puede realizar un porcentaje de la geometría como se muestra en la ilustración 95 imagen 1, el número de pasadas de acuerdo a la ecuación del paso es de 14. En la siguiente ilustración se puede ver la estrategia.

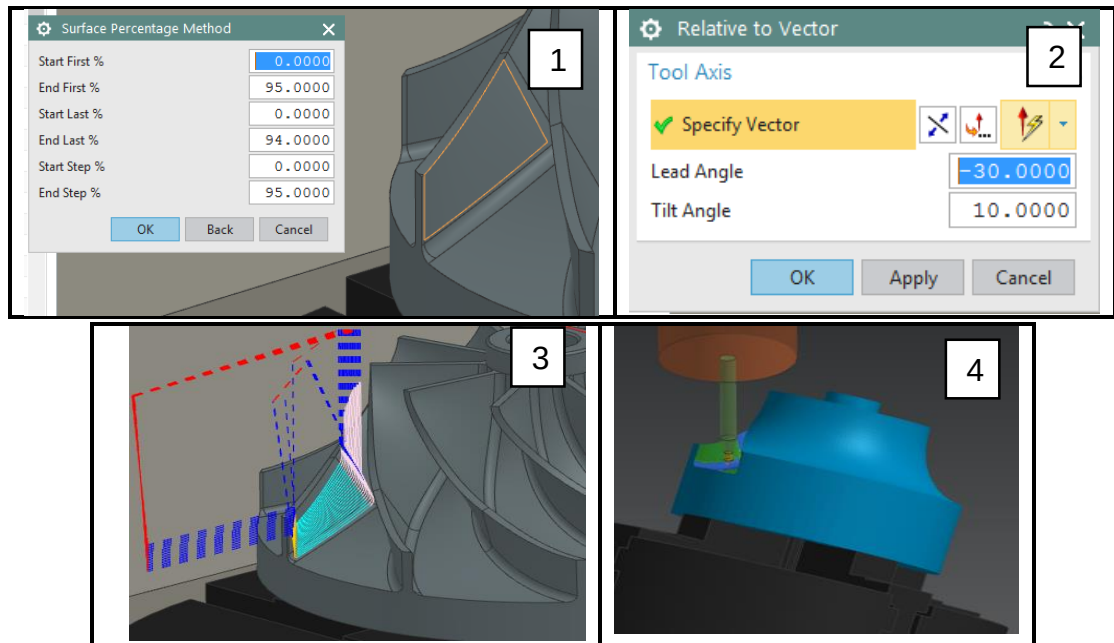
Ilustración 117. (1) Área de corte (2) ángulos “Lead and Tilt” (3) resultado de la trayectoria
(1) Simulación de operación de acabado en el fondo de la cavidad del impeller



Fuente Autor

Siguiendo con la estrategia el paso siguiente es seguir con la parte del álabe izquierdo, esta operación de acabado se realiza en la parte inferior del álabe y tienen una cantidad de 20 pasadas. En la siguiente ilustración se puede ver la estrategia utilizada.

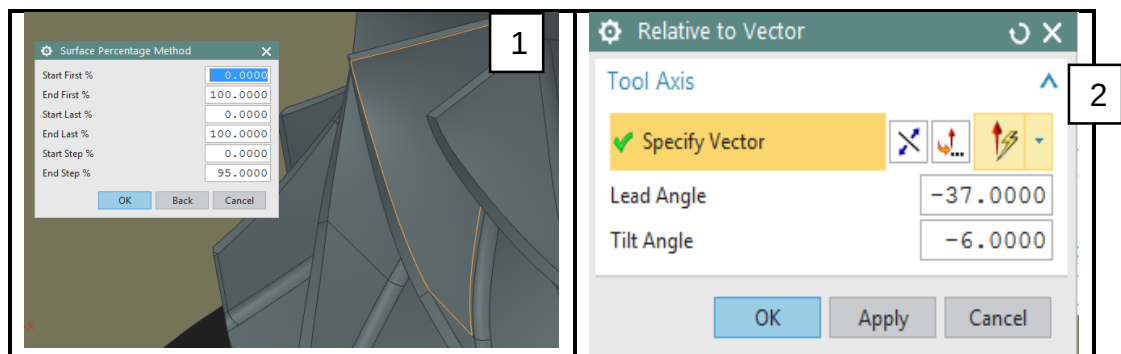
Ilustración 118. (1) Área de corte (2) ángulos “Lead and Tilt” (3) resultado de la trayectoria
(1) Simulación de la cuarta operación de acabado

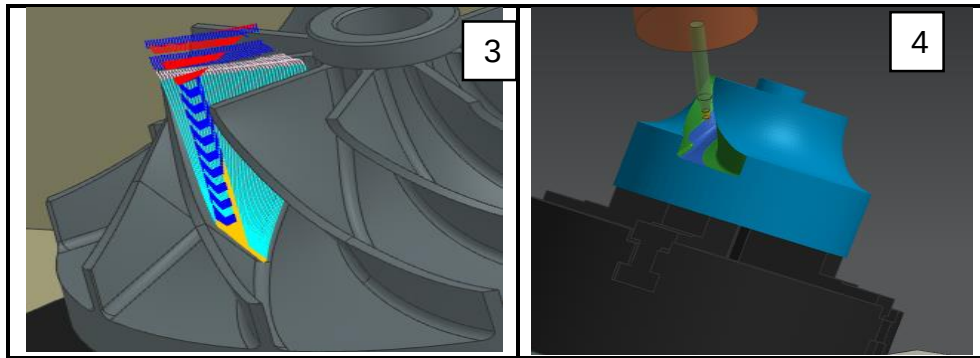


Fuente: Autor

Para finalizar con el acabado del álabe izquierdo se realizó la operación de acabado a la parte superior de este, siguiendo con la estrategia se calculó un número de pasadas de 40 para esta parte del álabe, en la siguiente ilustración se puede ver la estrategia.

Ilustración 119. (1) Área de corte (2) ángulos “Lead and Tilt” (3) resultado de la trayectoria
(4) Simulación de la operación de acabado del álabe izquierdo parte superior



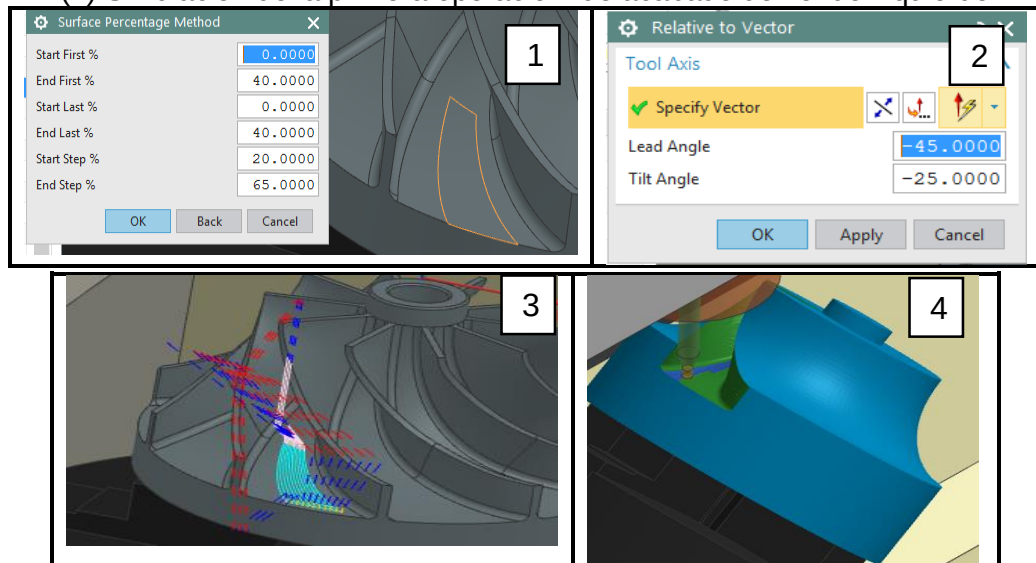


Fuente: Autor

Para finalizar con la estrategia de manufactura del *impeller* el siguiente paso es hacer el fondo izquierdo, sin embargo este lado presenta un problema para la estrategia que se ha estado siguiendo, el problema es debido a la geometría del *impeller* más específicamente en el álabe derecho, al generar una estrategia con unos ángulos “*Lead and Tilt*” la herramienta colisiona con el álabe debido a la limitante de maniobrabilidad generada por el uso de 4+1 ejes, en consecuencia, fue necesario generar una nueva estrategia; para solucionar este problema se decidió hacer esta parte del fondo de la cavidad izquierda en varias operaciones, es decir dividir el área de corte en diferentes áreas de corte haciendo múltiples operaciones de “*VARIABLE_CONTOUR*” para poder terminar con el acabado de esta zona. Siguiendo esta estrategia se probó con múltiples áreas de corte, todas se simularon en la máquina virtual comprobando que no presente colisiones con el álabe derecho, como resultado se programaron 6 operaciones que debido a que cada operación tiene ángulos “*Lead and Tilt*” diferentes lo que disminuye el riesgo a una colisión y mejora el proceso, estas operaciones se describirán a continuación.

La primera operación para el fondo izquierdo de la cavidad fue realizada en la parte inferior en la región central, se tomó un área de corte que va hasta la mitad del fondo de la cavidad del *impeller* como se ve en la ilustración 98 imagen (1) debido a que en esta parte es donde el álabe toma un ángulo abierto y es por donde colisiona la herramienta en la operación normal. En la siguiente ilustración se puede ver la estrategia usada.

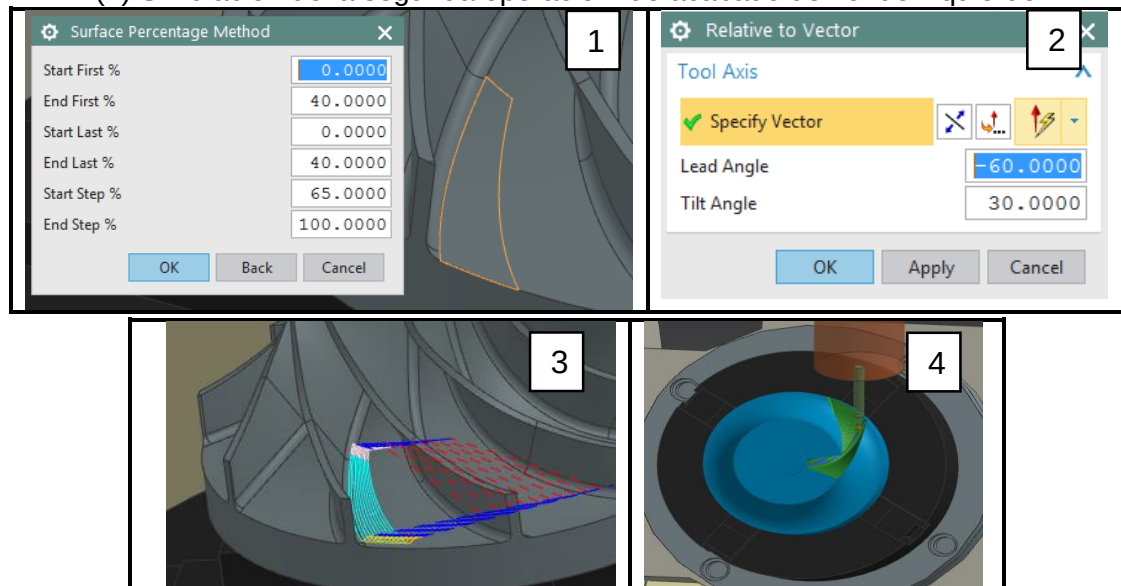
Ilustración 120. (1) Área de corte (2) ángulos “Lead and Tilt” (3) resultado de la trayectoria (4) Simulación de la primera operación de acabado del fondo izquierdo



Fuente: Autor

La segunda operación es continuar con el area inferior del fondo de la cavidad. En la siguiente ilustracion se puede ver la estrategia.

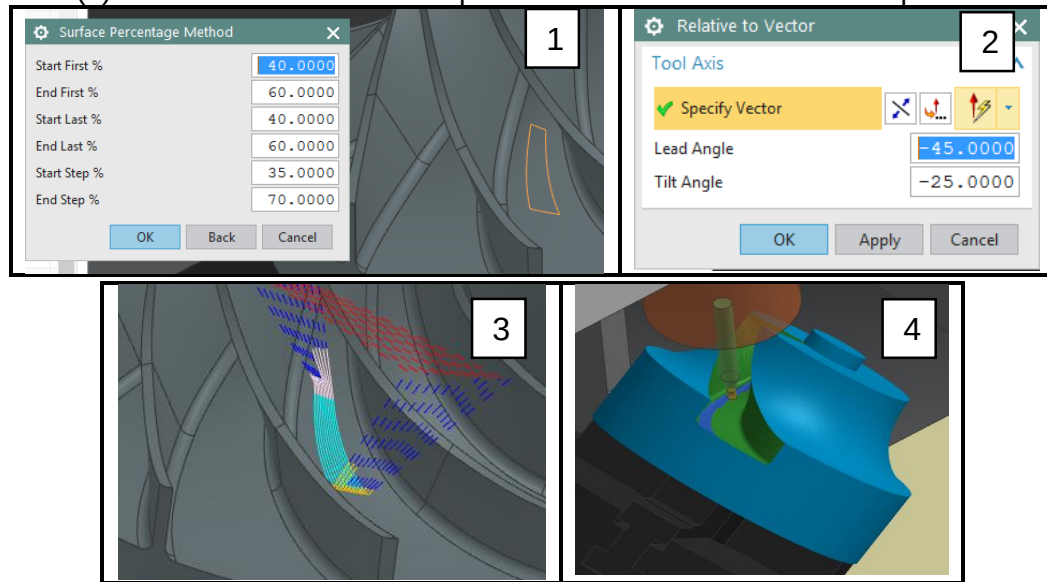
Ilustración 121. (1) Área de corte (2) ángulos “Lead and Tilt” (3) resultado de la trayectoria (4) Simulación de la segunda operación de acabado del fondo izquierdo



Fuente: Autor

La tercera operación fue la programación de la parte media del fondo del impeller, esta es la parte mas critica de la estrategia dado que la herramienta al tener unos valores de angulos “*Lead and Tilt*” tiene una inclinacion la pieza de trabajo y al realizar la salida o movimiento en vasio puede haver una colicion con el alabe por tal motivo esta parte media del fondo se dividio en 2 areas de corte como se muestra esn la siguiente illsutacion.

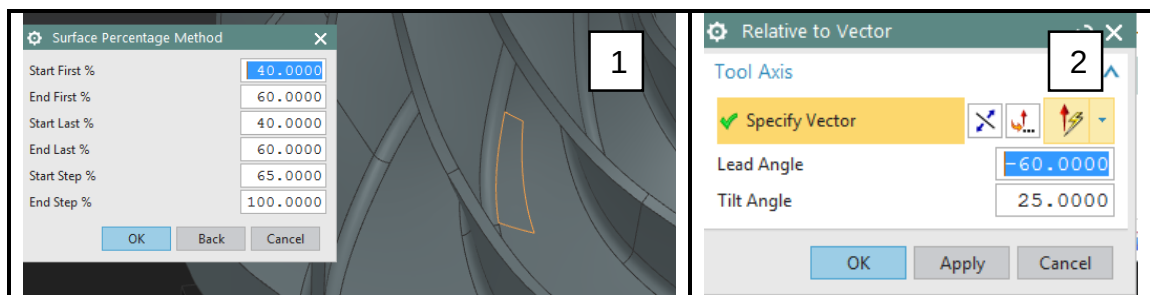
Ilustración 122. (1) Área de corte (2) ángulos “Lead and Tilt” (3) resultado de la trayectoria (4) Simulación de la tercera operación de acabado del fondo izquierdo

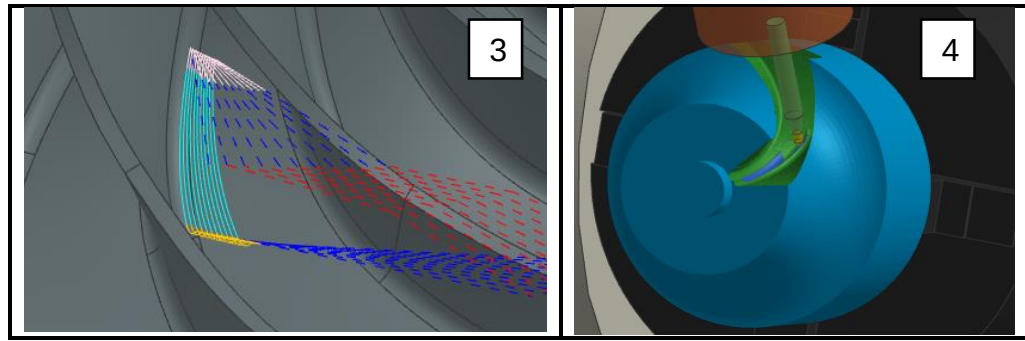


Fuente: Autor

En la cuarta operación se completa el area de corte de la parte media del fondo izquierdo del alabe. En la siguiente ilustracion se ve la estrategia empleada.

Ilustración 123. (1) Área de corte (2) ángulos “Lead and Tilt” (3) resultado de la trayectoria (4) Simulación de la cuarta operación de acabado del fondo izquierdo

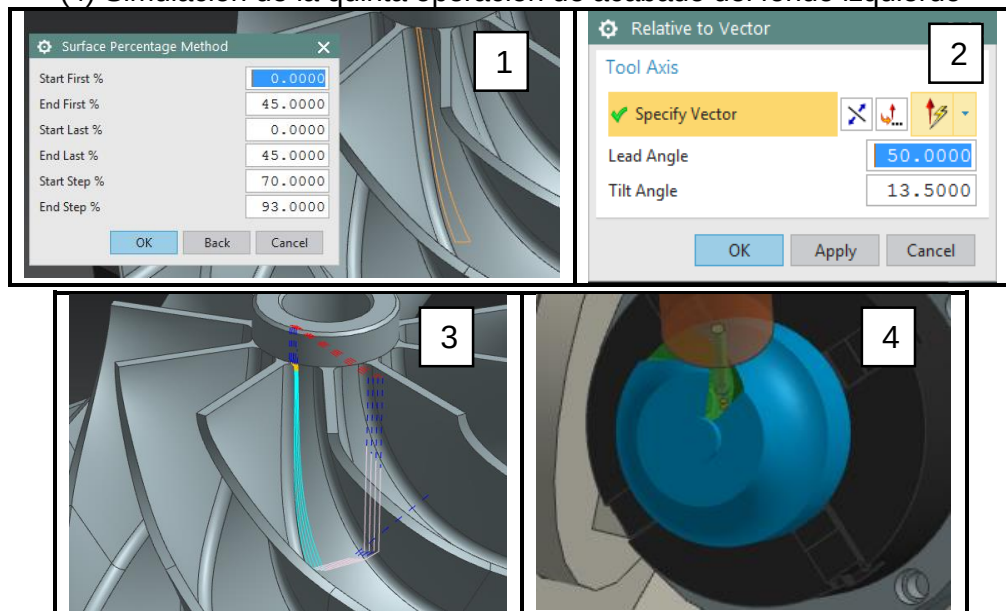




Fuente: Autor

La siguiente operación es realizar la parte superior del fondo izquierdo de la cavidad, estas seguimos con la estrategia de dividir esa ara de corte en 2, en la siguiente ilustracion se puede ver la estrategia empleada.

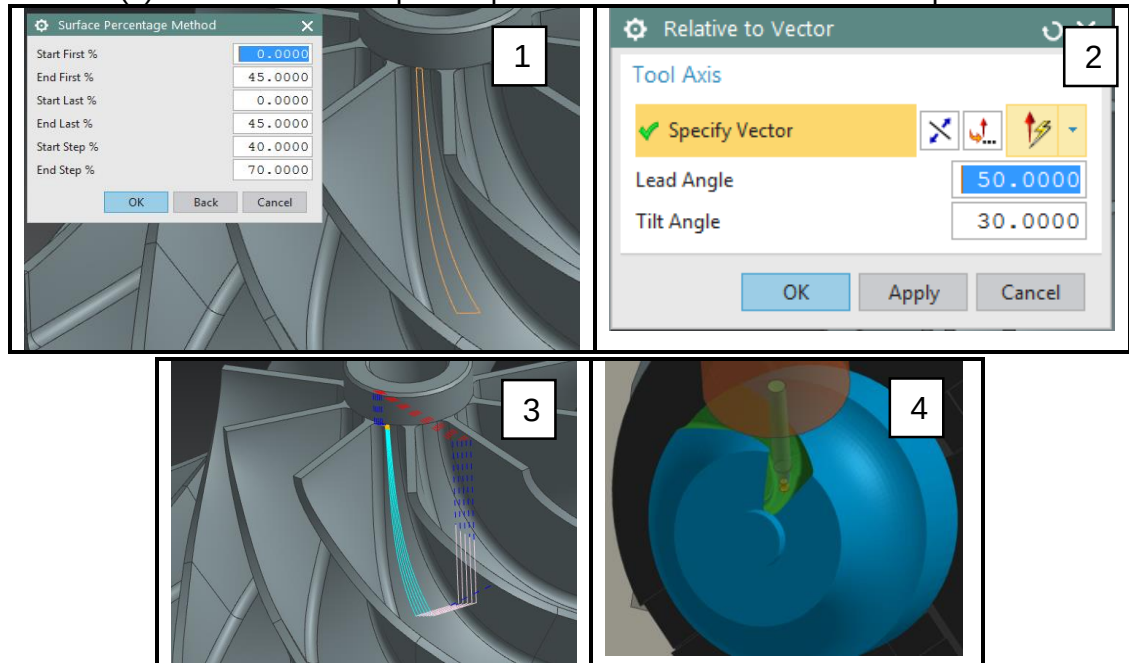
Ilustración 124. (1) Área de corte (2) ángulos “Lead and Tilt” (3) resultado de la trayectoria (4) Simulación de la quinta operación de acabado del fondo izquierdo



Fuente: Autor

Por ultimo la sexta operación completamos el area del parte superior de la cavidad, con esta operación se finaliza el acabado de del fondo del *impeller* dando resultado a la estrategia planeda para esta parte de la geoemtria. En la siguiente ilustracion se puede ver la estrategia empleada.

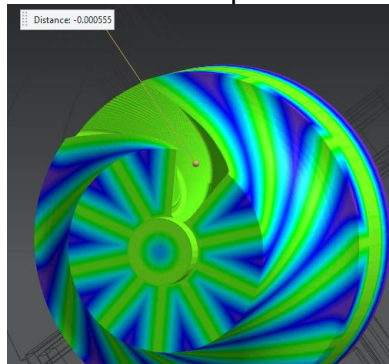
Ilustración 125. (1) Área de corte (2) ángulos “Lead and Tilt” (3) resultado de la trayectoria (4) Simulación de la quinta operación de acabado del fondo izquierdo



Fuente: Autor

El resultado de las diferentes estrategias de desbaste y acabado finalizó con la primera cavidad del *impeller* con múltiples operaciones que abarcan diferentes caras de corte y ángulos de herramienta, en consecuencia, la manufactura durante la simulación avanzada no presenta colisiones y deja un acabado superficial bueno por lo que podemos generar estas operaciones para las demás cavidades del *impeller* y formar la geometría final con los álabes terminados, en la siguiente ilustración podemos ver la calidad del acabado de la primera cavidad.

Ilustración 106. Análisis virtual de NX en la superficie de la primera cavidad del *impeller*



Fuente: Autor

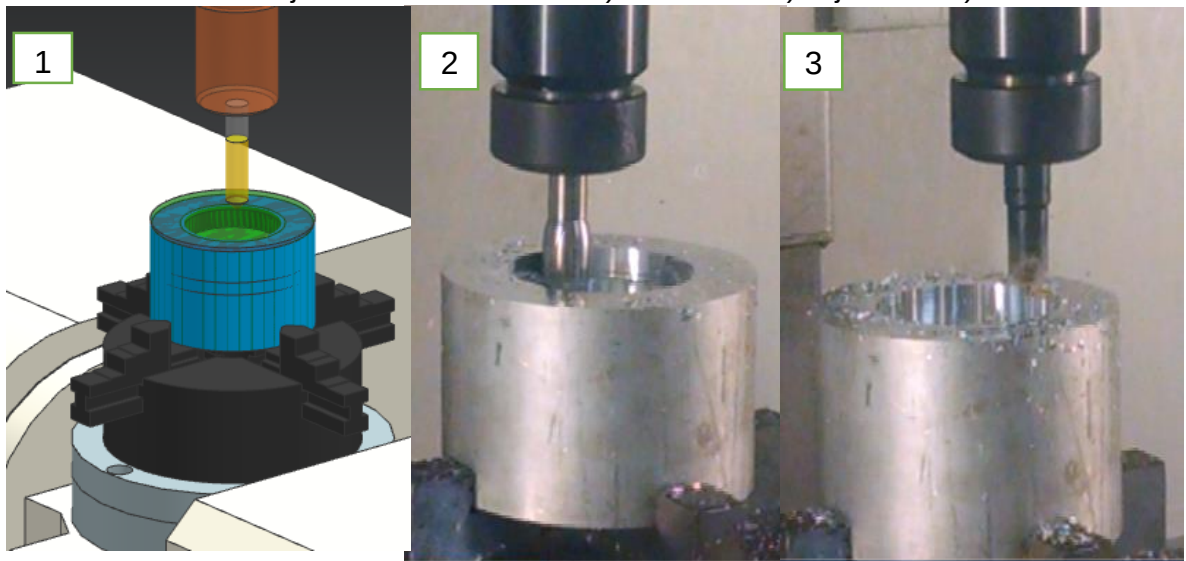
7. FABRICACIÓN DEL IMPELLER

Una vez establecido todo el plan de manufactura se procede a la fabricación del impeller, en los anexos se puede observar el flujograma del proceso de manufactura y los planos para cada uno de los procesos impeller, pre-maquinado, material en bruto ajustes.

7.1 Manufactura ajuste material en bruto

El primer paso es realizar los pre-ajustes con el cuales se realiza un cajoneado el cual va a ser el sistema de sujeción para el mecanizado del *impeller*, para este proceso se realizaron 3 mecanizados el planeado superior, cajoneado, y achaflanado, antes de realizar el mecanizado de esta pieza se realizaron las compensaciones y montajes de las herramientas de corte como también el montaje de la pieza en la copa al cual se le asignó el cero de pieza, una vez realizado esto se procede a enviar el código CNC previamente verificado al centro de mecanizado y se procede a la manufactura de la pieza.

Ilustración 126 ajuste material en bruto 1) simulación 2) cajoneado 3) avellanado



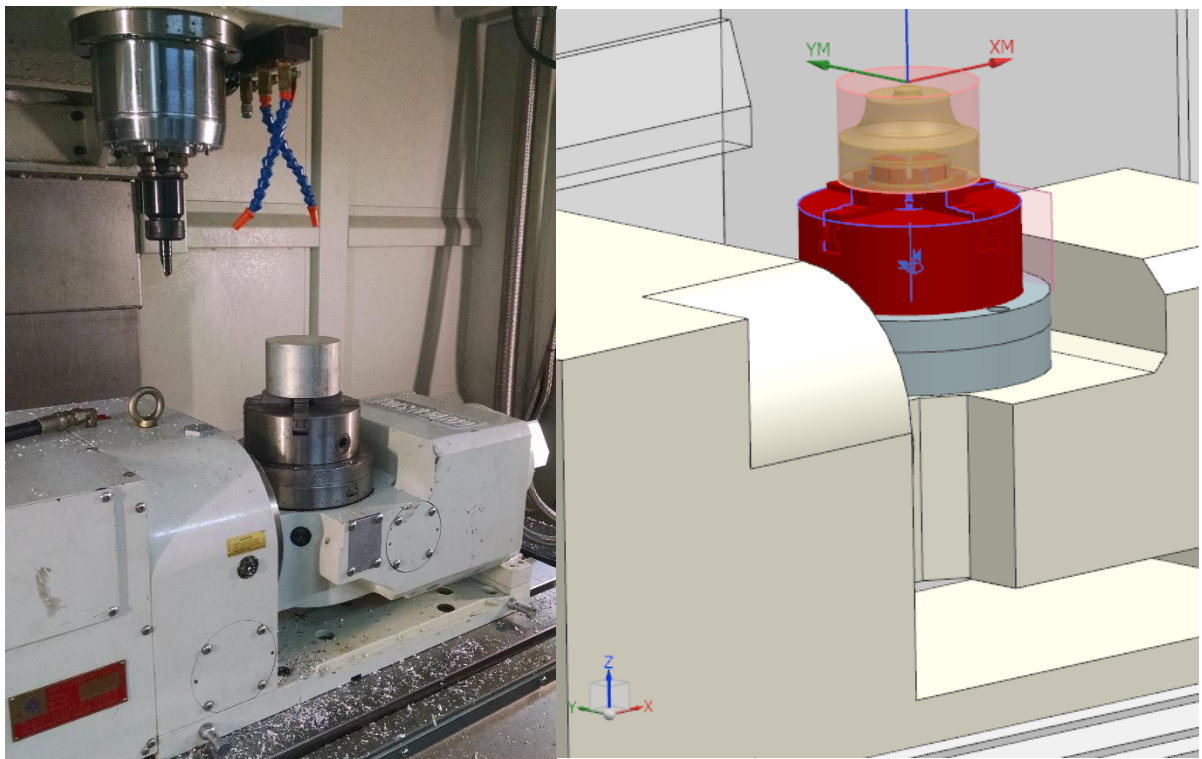
Fuente: Autor

7.2 Pre-maquinada fabricación del impeller

Con el pre-maquinado se realiza el mecanizado del perfil del alabe dentro de este proceso se realizan 4 operaciones de desbaste y una final de acabado esta operación de acabado se realiza para no hacer un mecanizado final sobre el alabe.

Con los ajustes previos realizados al material se procede al montaje en la copa la cual se tiene que realizar el cambio de las mordazas ya que la fuerza no va a ser realizada hacia el centro sino hacia afuera como se ve en las imágenes.

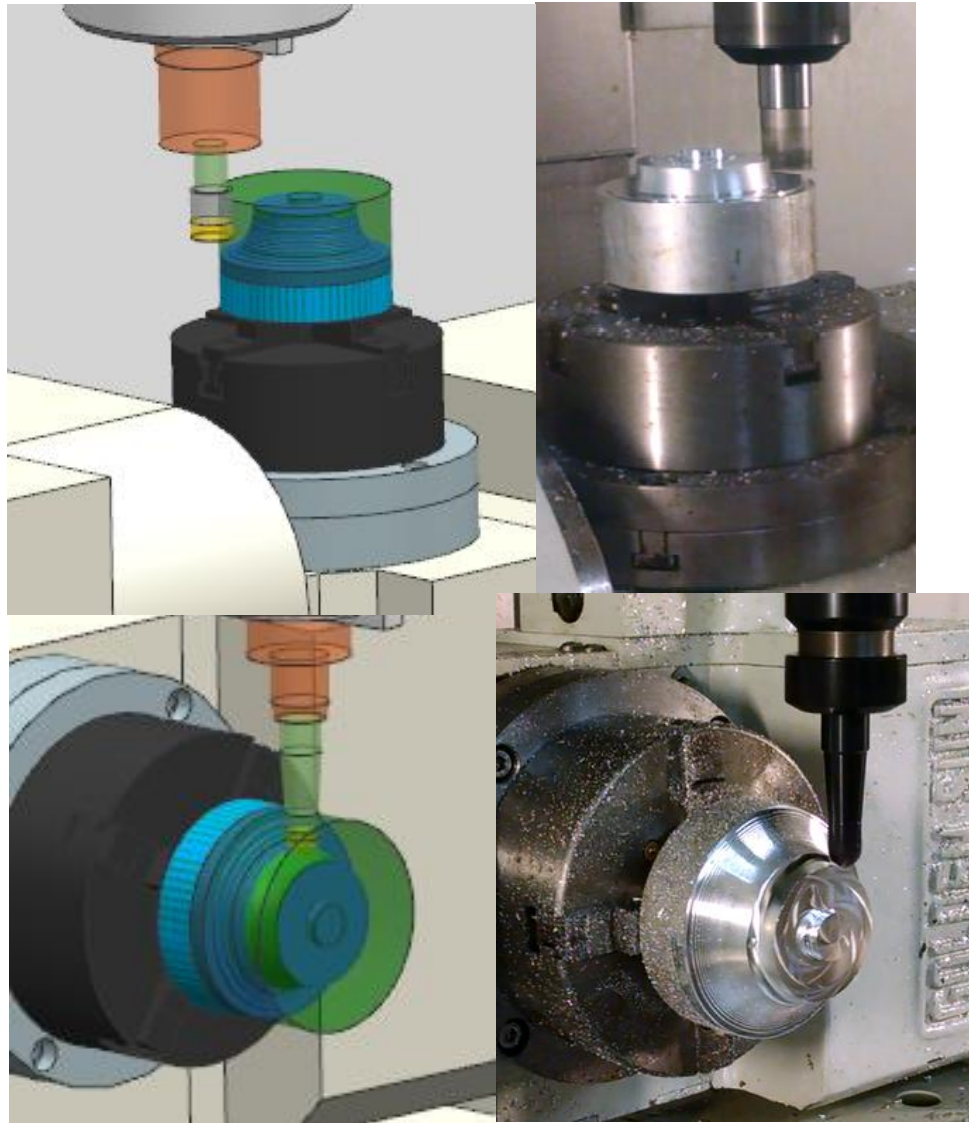
Ilustración 127 montaje material en bruto



Fuente: Autor

Al realizar todo el montaje se procede a designar el cero de pieza verificación del montaje de las herramientas en el junto con el cono simulado se verifican las medidas virtuales como también las medidas reales y las variables de corte una vez verificado se genera el código CNC y es transferido a la maquina en la siguiente imagen se ve la documentación del proceso de mecanizado

Ilustración 128 mecanizado pre maquinado impeller



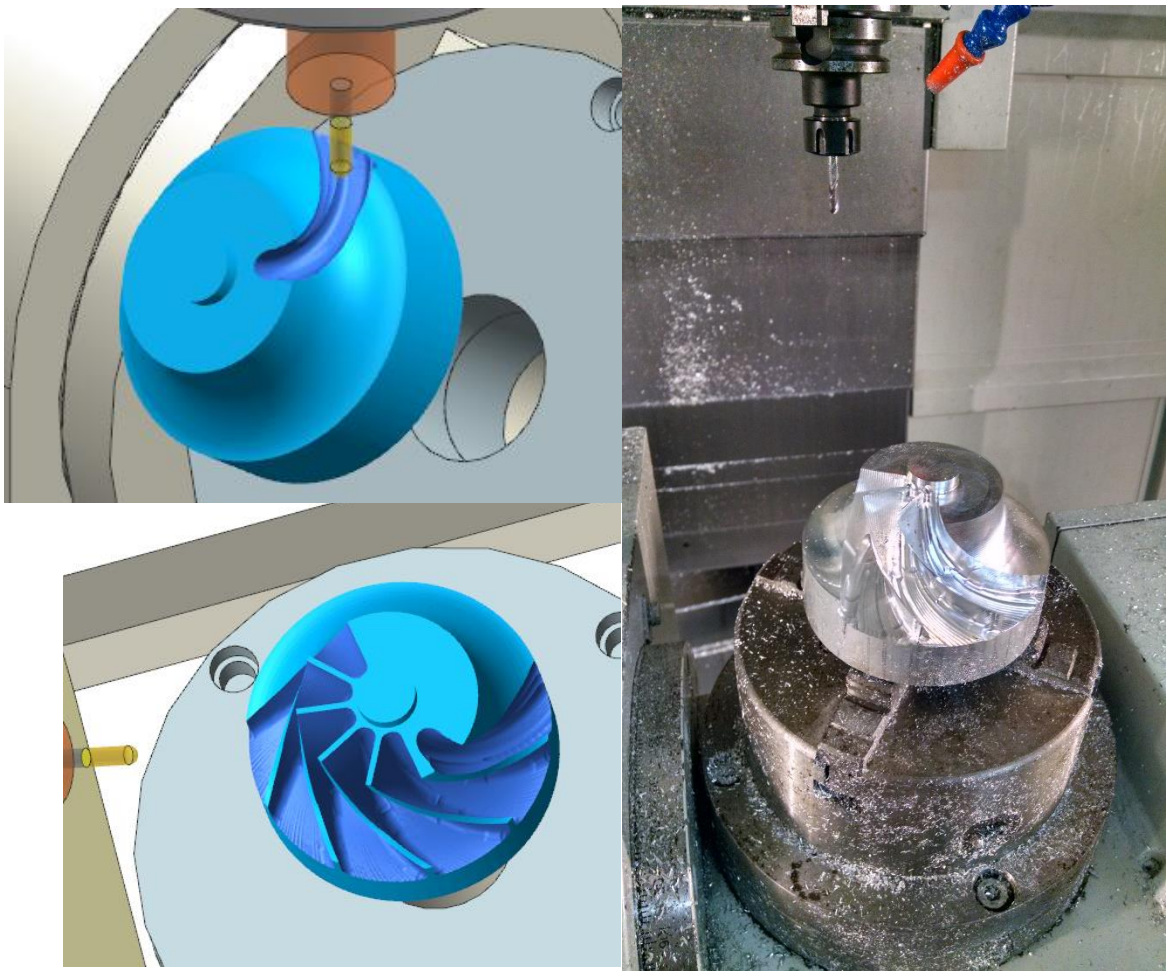
Fuente: Autor

Al terminar el mecanizado se pudo apreciar un error, y se logró determinar que fue por un error del ensamble, la pieza estaba 2mm más alto en la máquina virtual que el cero de pieza ubicado en el centro de mecanizado, por lo cual este error fue más evidente cuando el basculante giro y empezó a mecanizar ya que había removido más material del estipulado en el plano. Para compensar el error se corrigió el proceso CAM volviendo a ensamblar la copa de manera adecuada, después de la corrección se volvió a generar el código CNC y se volvió a correr en el centro de mecanizado para que la pieza quedara bien mecanizada, aunque con unas medidas por debajo de la medida del diseño.

7.3 Proceso de manufactura fabricación del impeller

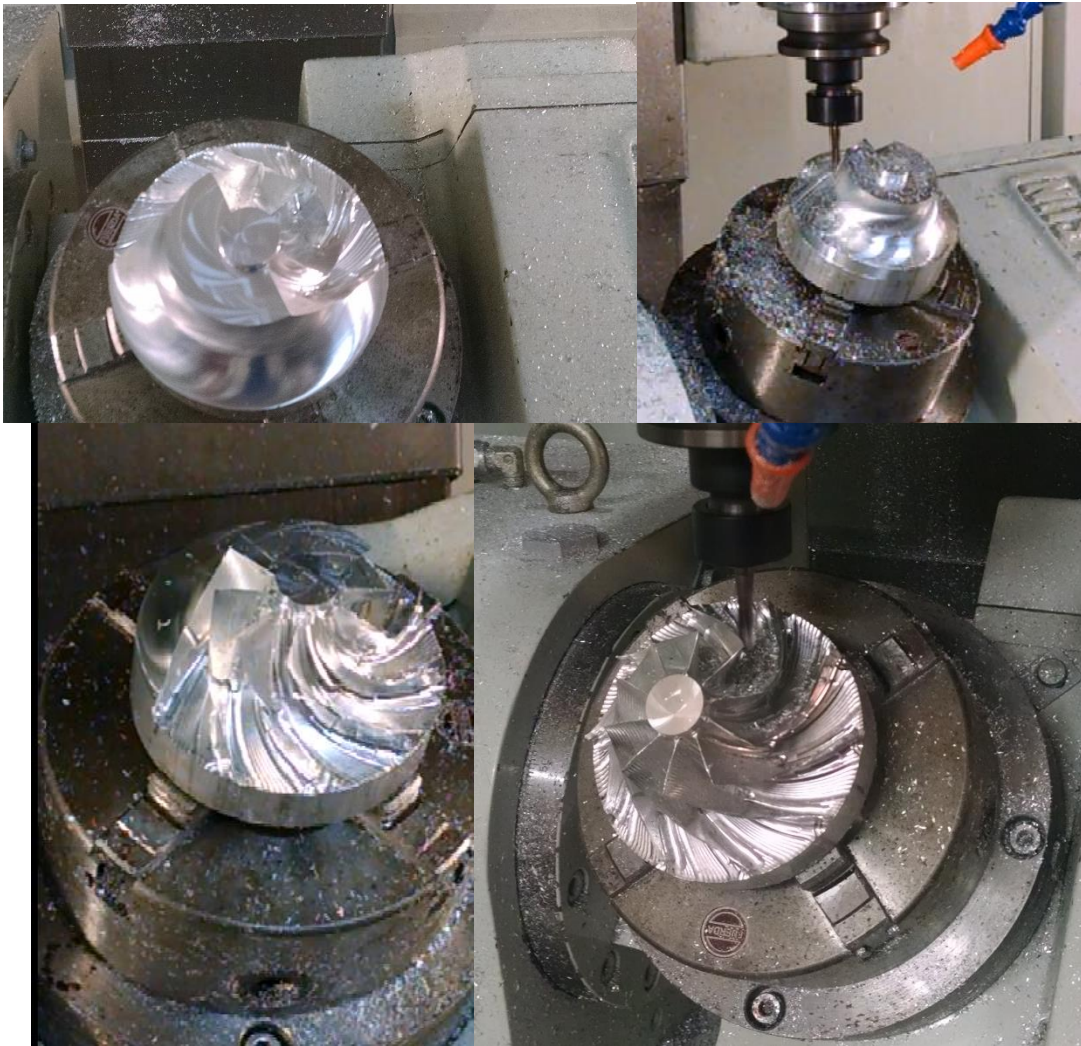
Con el proceso de pre-maquinado ya terminado se procede a la fabricación de los alabes se conserva el mismo montaje y cero de pieza, se verifica la herramienta de desbaste y acabado, que estén montadas en los conos simulados, se realiza la verificación para realizar el proceso de desbaste virtual y genera el código CNC y es transferido a la máquina, para fabricar todos los alabes se rotara el origen de la pieza 36 grados cada vez que se realice un alabe hasta completar 10 en las siguientes imágenes se ve el proceso de manufactura de los alabes

Ilustración 129 fabricación de los alabes



Fuente: Autor

Ilustración 130 Mecanizado de los alabes



Fuente: Autor

Durante el proceso de mecanizado se puede apreciar un error en el cual los albes quedaron muy delgados en la siguiente seccion se explica las posibles causas que hicieron que la herramienta cortara mas material de lo que fue diseñado y programado, no se manufacturo el acabado por causa del error ya que el espesor de los albes es muy pequeño y se podrian dañar. Por el error de manufactura no se pudo tener una pieza 100% completa pero se logro cumplir el objetivo de usar un mecanizado multieje en el cual no hubieron inconvenientes de colisiones o errores internos, todo el progrma corrio normalmente hasta tener la pieza terminada como se puede apreciar en las imágenes, durante el proceso de mecanizado de 4 ejes se pudieron comprobar los movimientos de cuatro ejes programados entre los cuales se variaron x,y,z y A como tambien con los ejes x, y,z y B

Ilustración 131 Impeller terminado

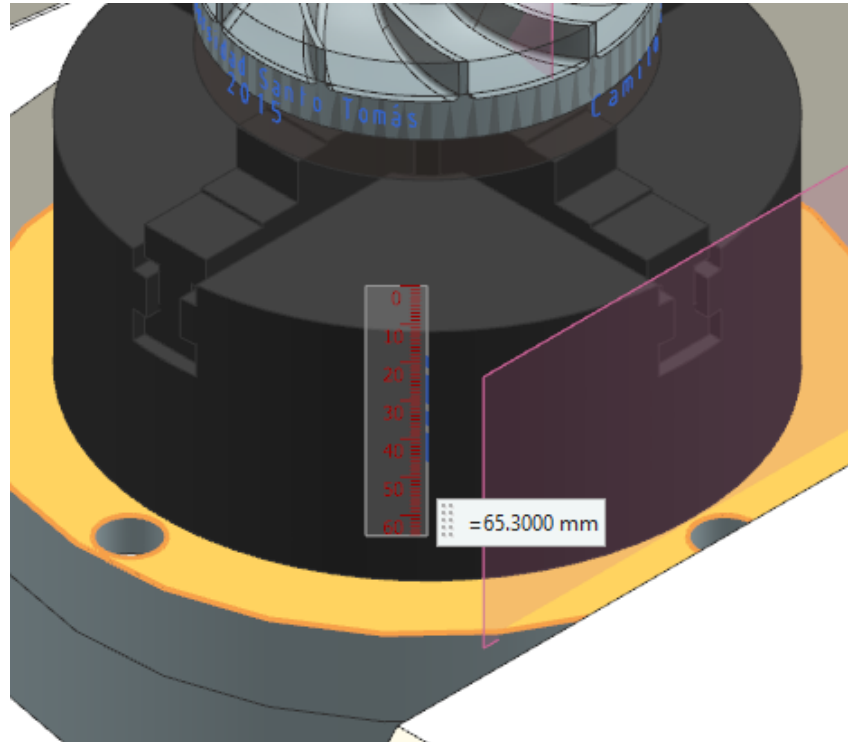


Fuente: Autor

7.4 Análisis de error en el mecanizado

Como se mencionó en los anteriores subcapítulos se evidenciaron errores en el mecanizado de la pieza el primer error ocurrió en el mecanizado de del pre-maquinado el cual en la basculación se removió más material que el permitido en el plano y diseñado en el software, este error ocurrió por un ensamble mal restringido Ya que la copa quedo 2 mm sobre la base de la misma como vemos en la imagen.

Ilustración 132 Error en el ensamble

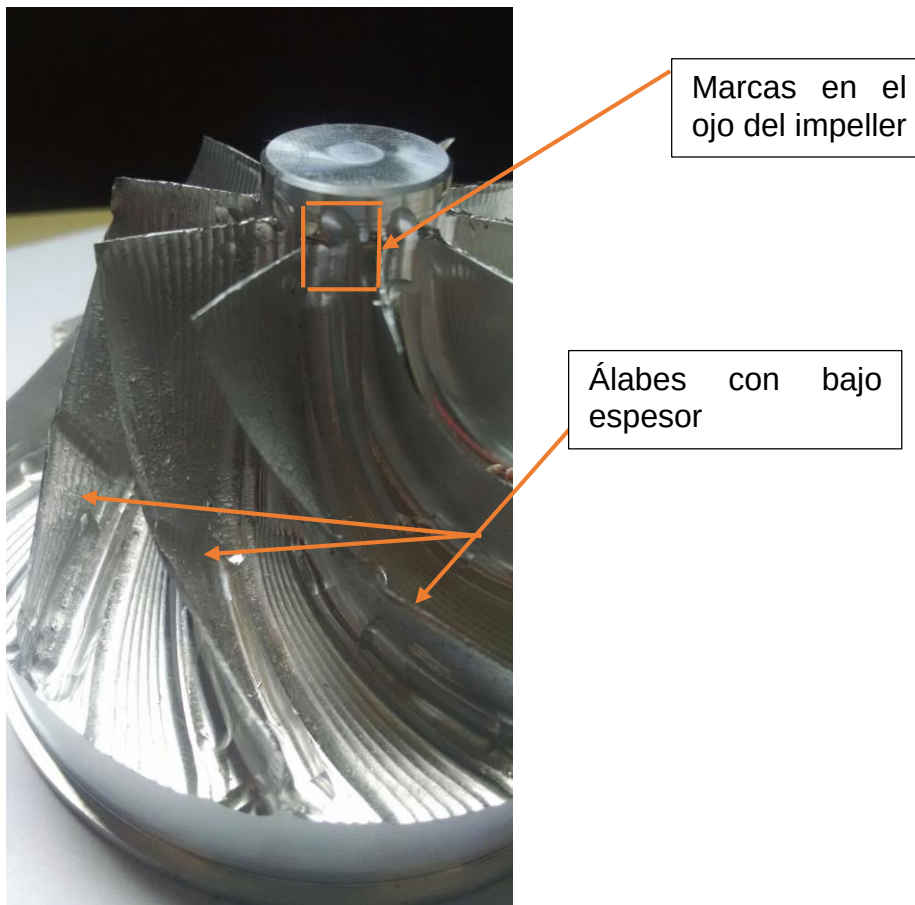


Fuente: Autor

En la imagen se ve la medida del ensamble a la que se encuentra en el centro de mecanizado esta medida antes era de 67.25 en la máquina virtual por lo cual fue el motivo para que al realizar la basculación la herramienta removiera más material de la parte superior del pre-maquinado y en la parte inferior no se hubiera removido nada de material.

El segundo error ocurrió en la fabricación de los álabes, ya que el espesor de estos quedo muy delgado como también la operación del fondo removió más material dejando marcas en el ojo del impeller como vemos en las siguientes imágenes.

Ilustración 133 marcas de mecanizado

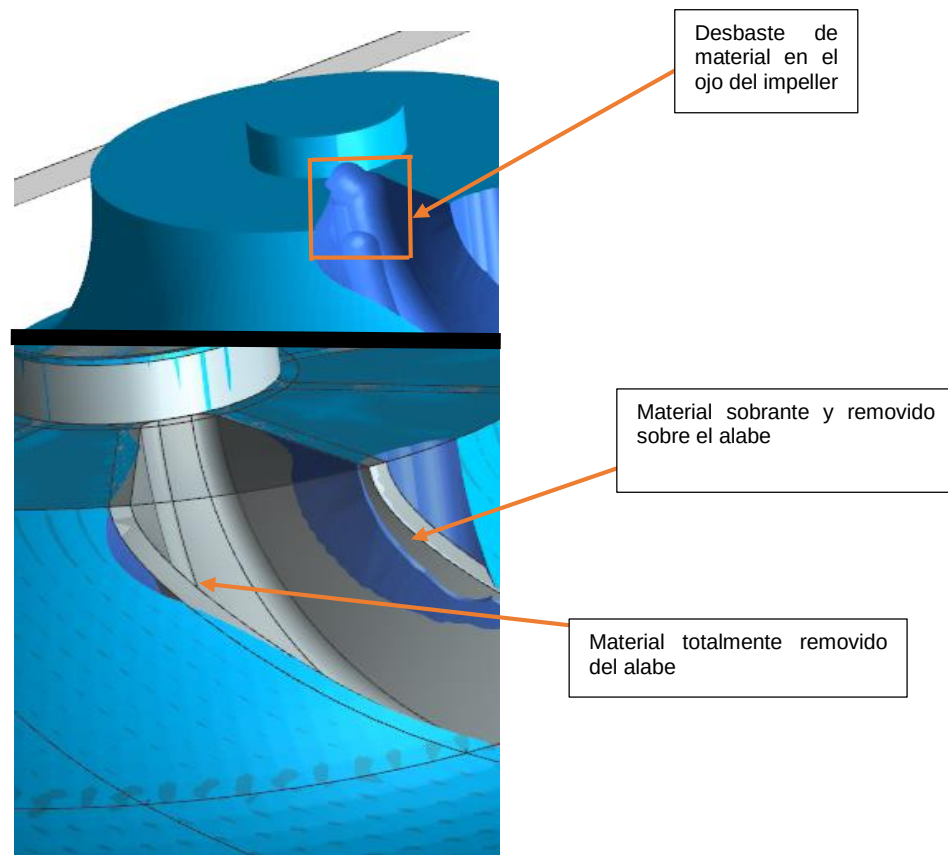


Fuente: Autor

Al observar las marcas y las características con las que quedo el álabe se procede a realizar un análisis por computadora en el cual se tomara el código usado en el centro de mecanizado y se verificara la posible causa del error.

Al realizar la simulación del código en el software NX se logra establecer que la causa del error fue por las alturas, ya que no se tuvo en cuenta que al reajustar el ensamble de la copa se bajó la copa y la pieza, pero en el centro de mecanizado la pieza se manufacturo y quedo desplazada 2mm por arriba en el mecanizado del material en bruto, por lo cual género que al empezar a mecanizar el alabe este estuviera por debajo del origen en la simulación por computadora aproximadamente 2mm. En la siguiente imagen se ve la simulación del código usado en el centro de mecanizado simulado en la máquina virtual

Ilustración 134 simulación error alabes



Fuente: Autor

En las imágenes se puede ver un mecanizado similar al que causo las marcas en el impeller, se puede apreciar que el mecanizado con un cero de pieza desplazado 2mm hacia abajo genera marcas las cuales dañan los álabes haciéndolos más delgados y el fondo de la pieza es mecanizado por debajo de lo establecido.

8. CONCLUSIONES

En el desarrollo de la tesis fue muy importante comprender desde el principio la pieza la cual se quería manufacturar en el centro de mecanizado, analizando matemáticamente su geometría paso el cual permitió la implementación de un CAD paramétrico el cual fue de gran ayuda, ya que con el análisis matemático se pudo comprender que se podía parametrizar y como se podrían manipular los datos de entrada, esto permitió analizar diferentes geometrías para ser manufacturas variando desde los ángulos de entrada y salida como también si tenía o no alabes intermedios, ángulos de inclinación del alabe, alturas del alabe y numero de alabes. Por lo cual fue fácil determinar en las simulaciones si era posible manufacturar la pieza con la tecnología disponible.

Durante el proceso se encontraron varios inconvenientes de colisiones lo cual limito la geometría de la pieza y llevo a hacer varios rediseños hasta encontrar una geometría manufacturable con la tecnología disponible, esto causo que no se realizara un impeller con la geometría ideal físicamente ya que unas de las variaciones fue el número de alabes real que era de 17, mientras que la manufactura lo limito a un máximo de 10, una de las grandes limitantes fueron las herramientas y también los ángulos permitidos en la tecnología 4+1 en una sola operación, ya que para la manufactura en desbaste se tuvieron que realizar en 13 operaciones independientes con diferentes ángulos Tilt and Lit y áreas de corte, por lo cual es una de las grandes limitaciones al usar 4 ejes simultáneos + basculación o rotación para el manufacturado del impeller.

Para el desarrollo de la tesis fue indispensable el uso de la máquina virtual desarrollada en el trabajo de grado del Ingeniero Yamid Reyes, esta herramienta permitió realizar toda la simulación y verificación del proceso de maquinado de forma virtual, permitiendo hacer un análisis detallados de cada una de las operaciones de manufactura y mirando la factibilidad de hacer uso de estas o descártalas, también fue una herramienta que permitió determinar que montajes se deberían hacer tanto de la pieza como de las herramientas de corte garantizando que no fuera a existir una colisión durante la fabricación de la pieza.

Con la tecnología del centro de mecanizado con el que cuenta universidad se demostró que realmente se pueden realizar operaciones en 4+1 ejes el cual permite la fabricación de distintas formas complejas. El software NX trae diferentes operaciones para el mecanizado mul-tieje el cual permitió establecer diferentes estrategias para el desarrollo de los procesos de manufactura del impeller el cual es una pieza bastante compleja por su geometría.

9. RECOMENDACIONES

Para el desarrollo de la manufactura se usaron unas estrategias de mecanizado las cuales fueron probadas en las máquinas virtuales, para el mecanizado multi-eje el software NX cuenta con diferentes opciones tanto en 5 como en 4 ejes en este proyecto se usó en mayor medida la opción *variable contour* la cual también tiene diferentes estrategias, muchas de estas fueron descartadas al realizar pruebas de mecanizado pero faltaron varias herramientas para probar, por lo cual las estrategias usadas en el proyecto no son las únicas que pueden ser usadas en mecanizado de 4 ejes +1

Una de las limitaciones al usar 4+1 ejes es que al mecanizar espacios muy cerrados en donde se requiera variaciones simultaneas de tilt y leat no se podrán realizar a ya que sería una operación que requiere de 5 ejes simultáneos, una forma pasar los 5 ejes a 4 +1 ejes es haciendo divisiones de la zona de trabajo pero estas podrían estar limitadas por las dimensiones de la herramienta por lo cual es muy importante tener una máquina virtual en la cual se puedan simular las estrategias de mecanizado

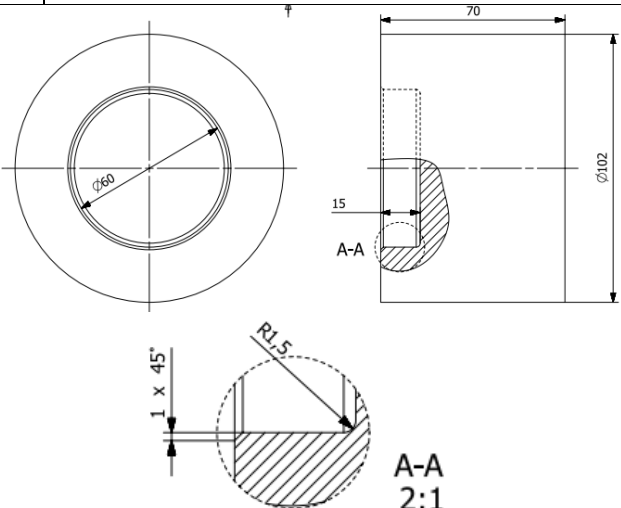
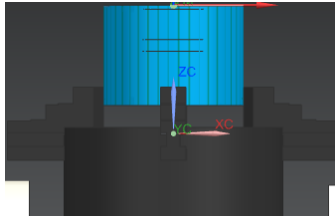
Un error en el mecanizado de la pieza fue un mal ensamble en la máquina virtual la cual en las operaciones de 3 ejes X, Y y Z no era notorio el error, pero al hacer la rotación de b y empezar a mecanizar en 3+1 y 4 +1 empezó a ser evidente el error el cual se intentó corregir en la ubicación del cero de pieza, pero este error causo que la herramienta removiera más del material establecido. Por esto es importante en proceso de manufactura virtual rectificar los ensambles de la pieza y componentes sean iguales a los reales para garantizar igualdad de resultados virtuales y reales.

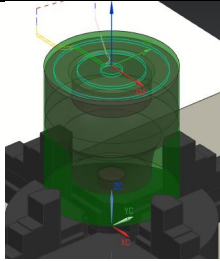
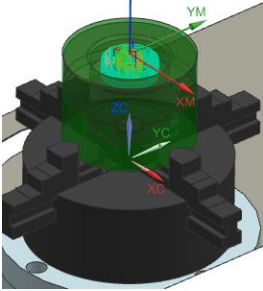
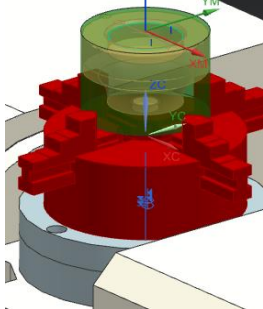
10. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Claudio Mataix “Turbomáquinas Térmicas_tubinas de vapor, turbinas de gas, turbocompresores -Tercera Edicion”,1973.
- [2] P. C. Hanlon, Compressor Handbook, McGraw-Hill,2010 .
- [3] S. Kalpakjian, S. R. Schmid, and Others, Manufactura, ingeniería y tecnología. 2002.
- [4] Y. G. R. Florez, “Desarrollo De Procedimiento Para La Generación, Simulación Y Verificación De Maquinado En Centro De Mecanizado CNC Multiejes Técnica 4+1 Y Su Aplicación En Montaje Experimental,” Universidad Santo Tomas, 2014.
- [5] J. Andrés, G. Barbosa, J. Manuel, and A. Osorio, “Simulación de Arranque de Viruta en Máquinas Multieje CNC,” Met. ACTUAL, pp. 48–53.
- [6] KLUGE, F, kreiseigen an kreiselverdichier radialer Bavart (turbosoplantes y turbo compresores radiales) Berlín, Springer 1953.
- [7] STODALA, steam anda gas turbines, 2 vols, New York, Peer Smith 1945.
- [8] STEPANOFF, turboblowers, New York, Jhon Wiley 1995, pagina 91
- [9] H. Khalili, a Maleki, and S. Ayatollahi, “Using Combination of Reverse Engineering and Value Engineering for Improvement in Designs, Construction Projects and Manufacturing Industries,” Usc.Edu, pp. 1–7, 2005.
- [10] S. L. Dixon, *Fluid Mechanics and Thermodynamics of Turbomachinery (Google eBook)*, no. 1995. 2005, p. 412.
- [11] S. Horbach, *Advances in Sustainable and Competitive Manufacturing Systems*. 2013, pp. 379–387.

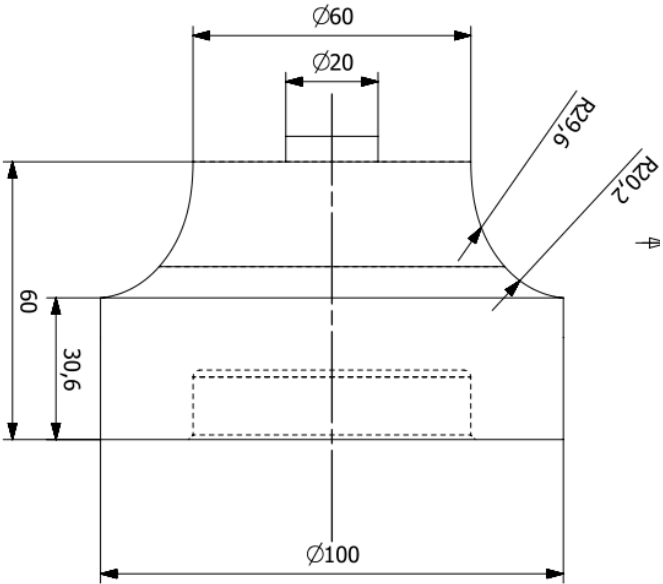
Anexos

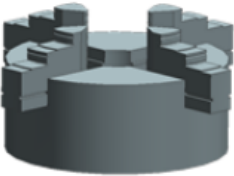
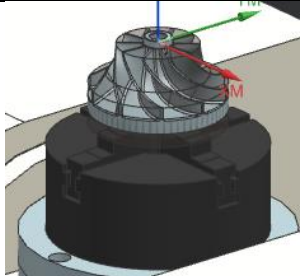
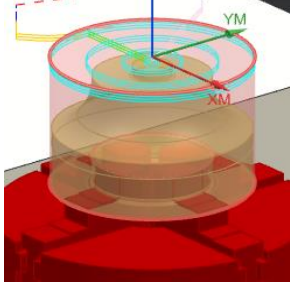
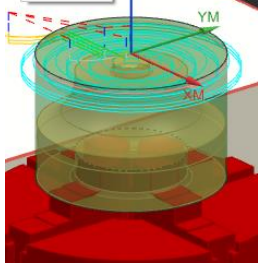
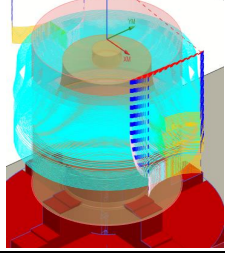
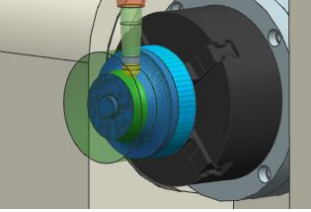
Hoja de proceso ajustes material en bruto

		Universidad Santo Tomas Facultad de ingeniería Mecánica Proyecto de Grado- <i>impeller</i> Adolfo Osorio-Camilo Castillo							
Hoja de proceso “Ajuste”									
Material Aleacion de aluminio 7074 T6		Dimensiones en bruto Cilindro de Ø 100 mm x 70mm			DIN 7168				
									
fase	designacion	herramienta	Croquiz	# de pasadas	RPM	Vc m/min	f mm/min	Ap mm	Tiempo seg
1	Montaje de materia prima en la copa	Copa con mordaza exterior		-	-	-	-	-	100

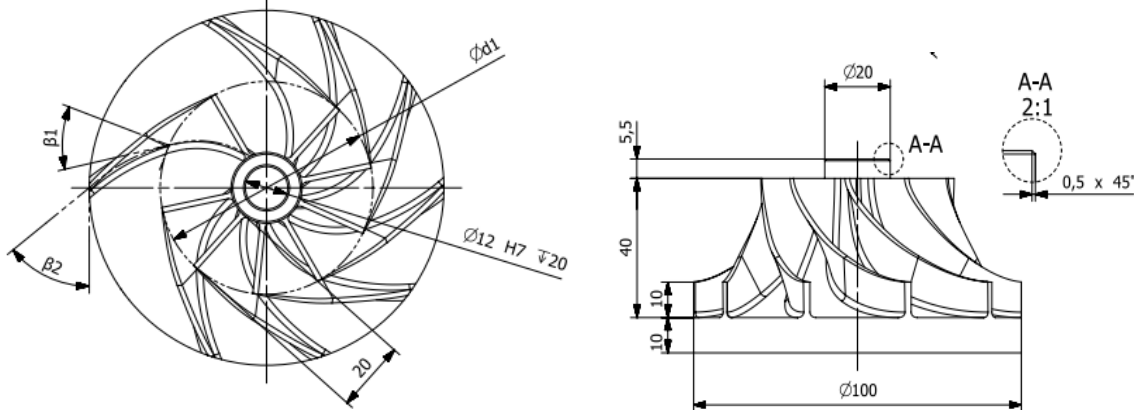
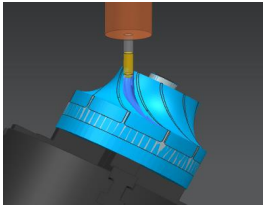
	Planeado	KORLOY AMS2025HS		2	5093	400	0.1	2	51
1	contorneado	MEC16-S12-11T		8	9947	500	0.06	2	415
	avellanado	NINE 9		1	6000	263	0.05	2.5	22

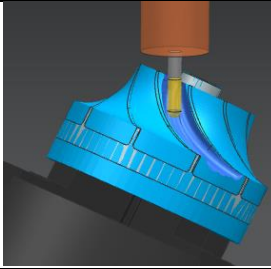
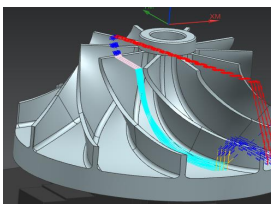
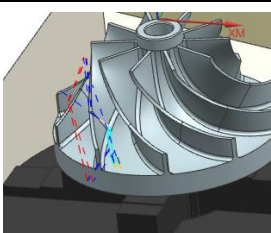
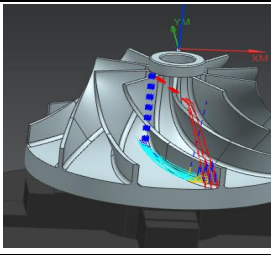
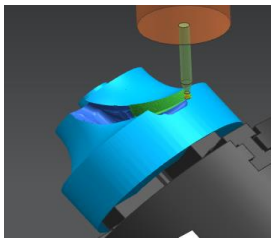
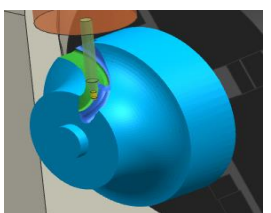
Hoja de proceso pre-maquinado

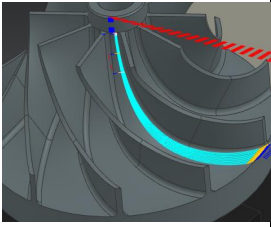
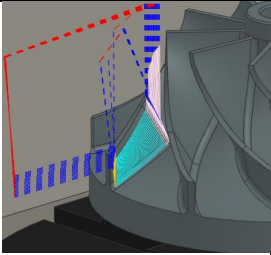
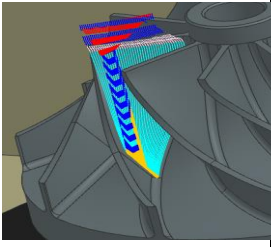
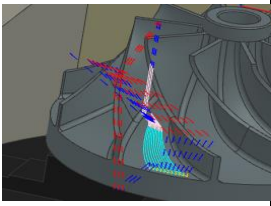
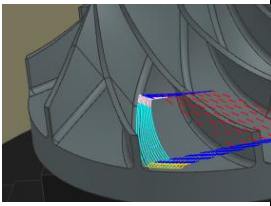
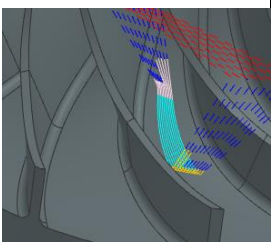
		Universidad Santo Tomas Facultad de ingeniería Mecánica Proyecto de Grado-<i>impeller</i> Adolfo Osorio-Camilo Castillo							
Hoja de proceso “Pre-maquinado”									
Material Aleacion de aluminio 7074 T6		Dimensiones en bruto Cilindro de Ø 100 mm x 70mm		DIN 7168					
									
fase	designacion	herramienta	Croquiz	# de pasadas	RPM	Vc m/min	f mm/min	Ap mm	Tiempo seg

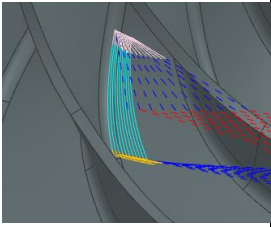
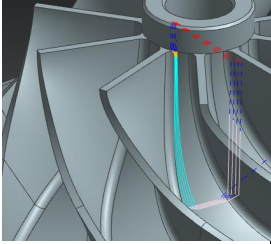
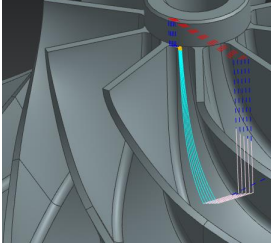
2	Cambio de mordazas a mordazas interiores	Mordazas interiores		-	-	-	-	-	120
	Dar vuelta al material y sugetar por el interior del <i>impeller</i>	Copa con mordazas interiores		-	-	-	-	-	120
2	planeado	KORLOY AMS2025HS		2	5093	400	0.1	2	119
	Contorno cilindro	KORLOY AMS2025HS		4	5093	400	0.1	2	219
	Contorno cilindro pre-maquinado	KORLOY AMS2025HS		144	5093	400	0.1	0.5	4124
	Acabado cilindro pre-maquinado	KYOCERA MRF 16-S20		-	5968	300	0.05	0.5	2424

Hoja de proceso *Impeller*

		Universidad Santo Tomas Facultad de ingeniería Mecánica Proyecto de Grado- <i>impeller</i> Adolfo osorio-camilo castillo							
Hoja de proceso <i>impeller</i>									
Material Aleacion de aluminio 7074 T6		Dimensiones en bruto Cilindro de Ø 100 mm x 70mm					DIN 7168		
									
fase	designacion	herramienta	Croquiz	# de pasadas	RPM	Vc m/min	f mm/min	Ap mm	Tiempo seg
3	Desbaste superficial 1	YG G9249012		5	9775	195	0.0230	1.2	312

	Debaste superficial 2	YG G9249012		2	9775	195	0.0230	1.2	58
3	Debaste central 3	YG G9249012		5	9775	195	0.0230	1.2	349
	Debaste 4 lateral izquierdo	YG G9249012		2	9775	195	0.0230	1.2	28
	Debaste 5 lateral dercho	YG G9249012		3	9775	195	0.0230	1.2	152
	Acabado								
3.1	Acabado àlabe inferior derecho	HGT BLM0306		1	15915	150	0.030	0	123
	Acabado àlabe superior derecho	HGT BLM0306		1	15915	150	0.030	0	230

	Acabado fondo parte derecha	HGT BLM0306		1	15915	150	0.030	0	130
3.1	Acabado àlabe izquierdo inferior	HGT BLM0306		1	15915	150	0.030	0	122
	Acabado àlabe izquierdo superior	HGT BLM0306		1	15915	150	0.030	0	224
	Acabado fondo izquierdo								
3.1.1	Fondo izquierdo 1 inferior	HGT BLM0306		1	15915	150	0.030	0	40
	Fondo izquierdo 2 inferior	HGT BLM0306		1	15915	150	0.030	0	32
	Fondo izquierdo 3 medio	HGT BLM0306		1	15915	150	0.030	0	39

	Fondo izquierdo 4 medio	HGT BLM0306		1	15915	150	0.030	0	39
	Fondo izquierdo 5 superior	HGT BLM0306		1	15915	150	0.030	0	20
	Fondo izquierdo 6 superior	HGT BLM0306		1	15915	150	0.030	0	24

Planos

En las siguientes 3 páginas se encuentra los planos en tamaño A3 y dos en A4

Plano 3 impeller

Plano 2 pre-maquinado

Plano 1 material en bruto ajustes de maquinado

Flujogramas

Después de los planos se encuentra lo flujogramas en tamaño A3

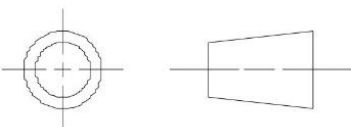
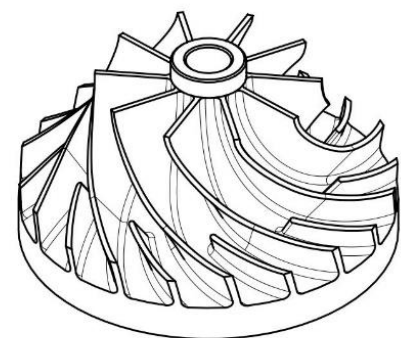
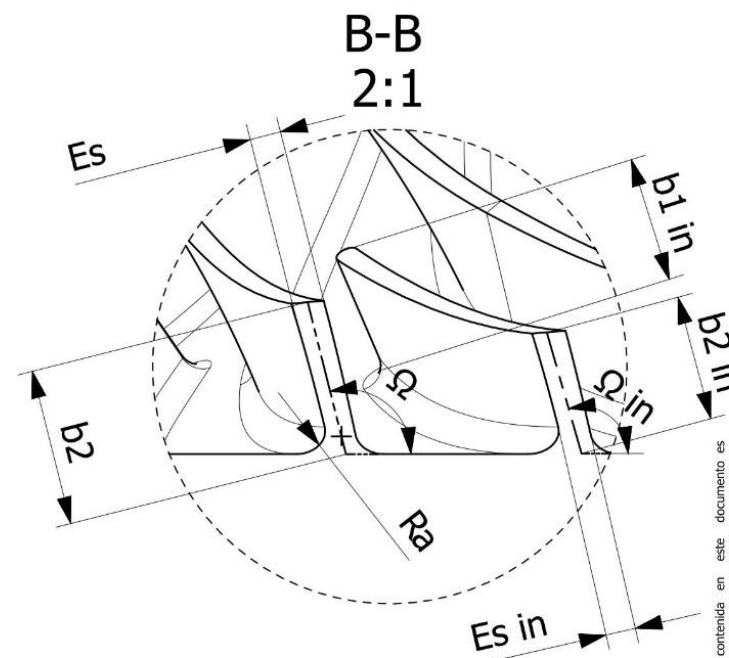
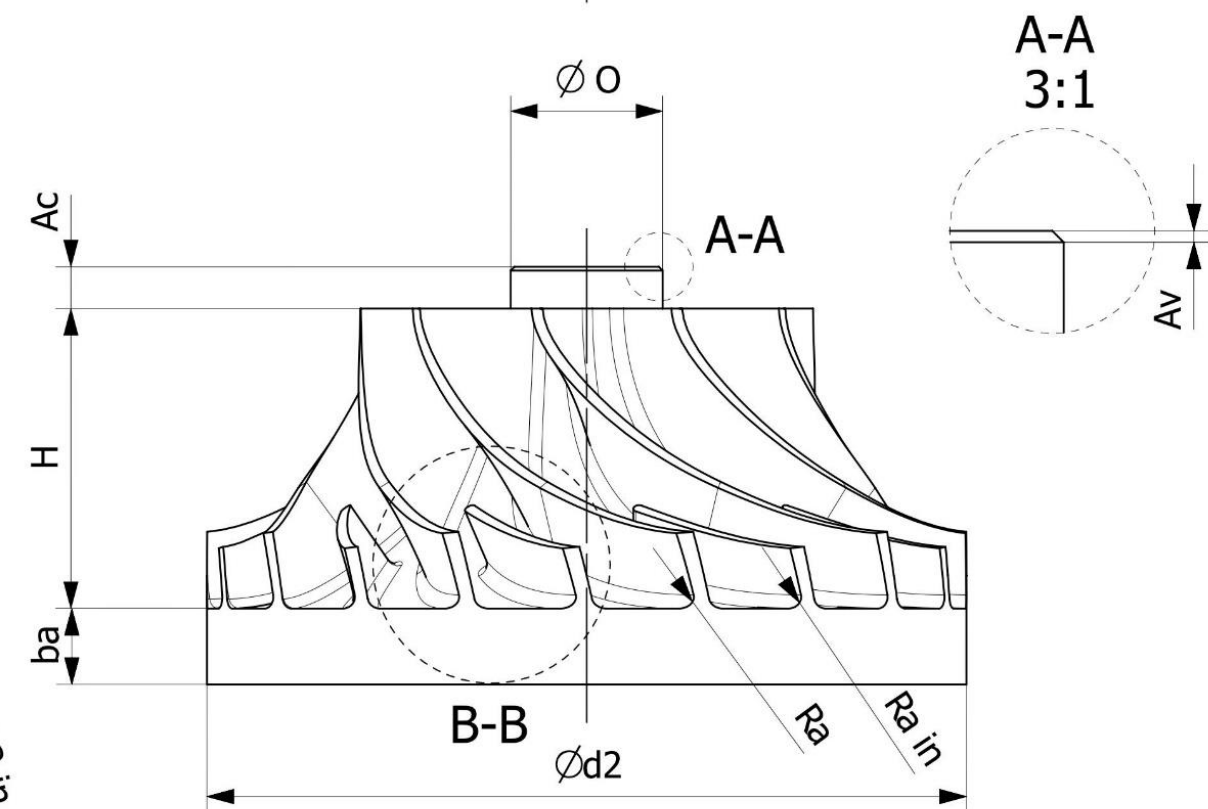
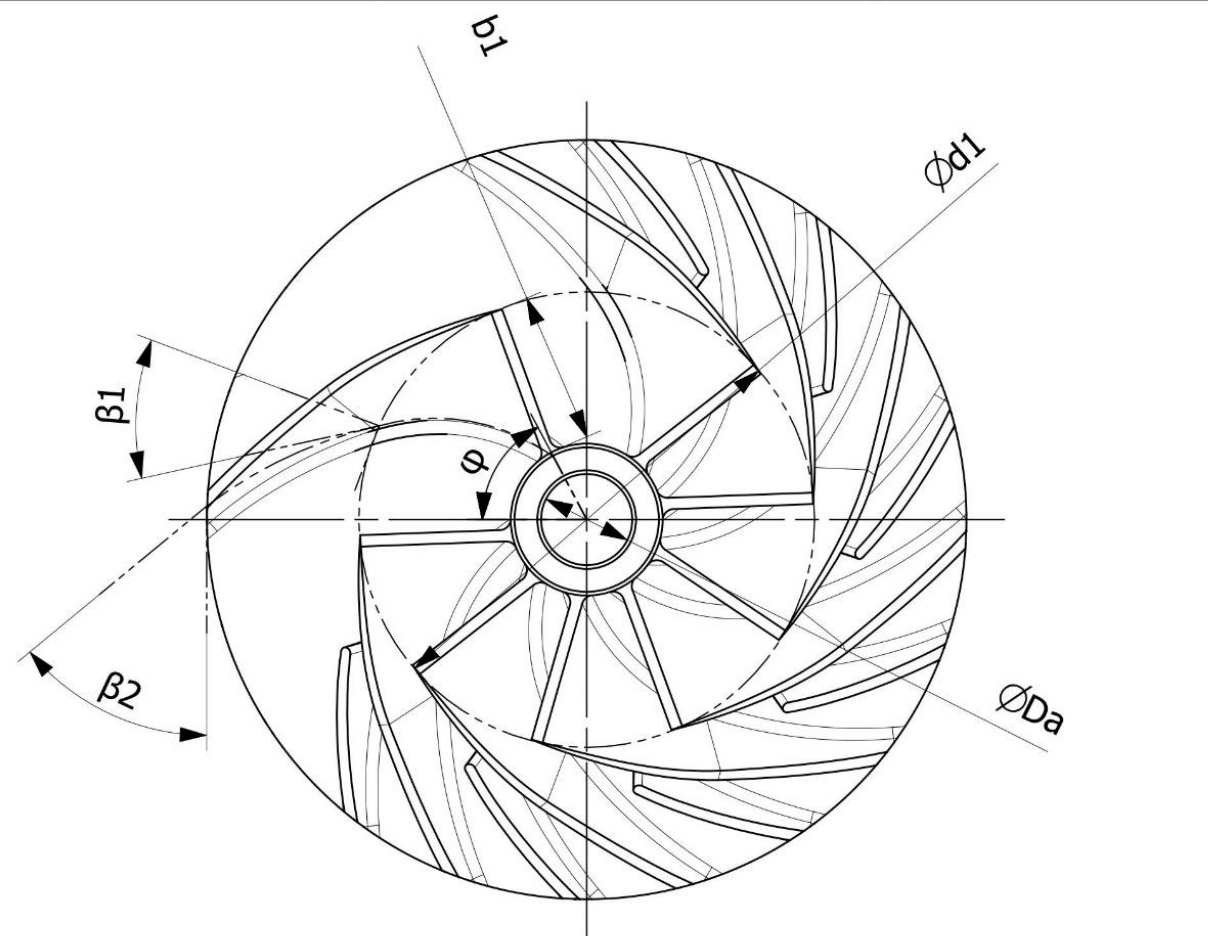
Flujograma diseño paramétrico

Flujograma proceso de manufactura

Dimensiones generales			
Alturas, d2 y dO		Ángulos y d1	
Ø d2	100mm	β1	40°
Ø O ₁	20 mm	β2	50°
H	40 mm	Ø d1	60mm
ba	10 mm		

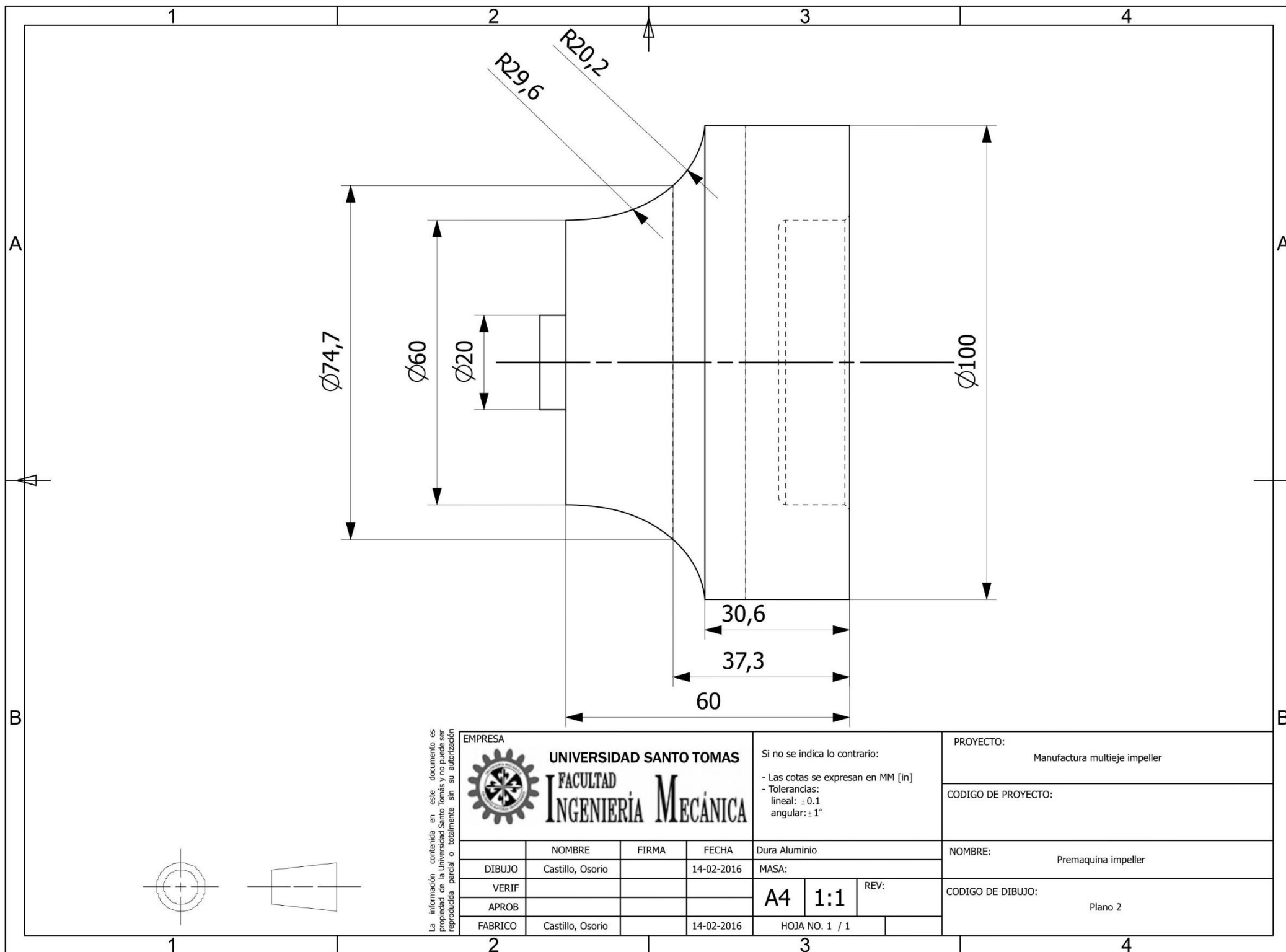
Álabe					
Álabes interno	si/no				
Número de alabes		Características		Dimensiones del álabe	
número álaves	10	Ω	60°	b1	20
φ	60°	Ra	1.5 mm	b2	10
		Es	1.5 mm	Alabe interno (si)	
		Alabe interno (si)		b1 in	10
		Ω in	60°	b2 in	5
		Ra in	1.5		
		Es in	1.5		

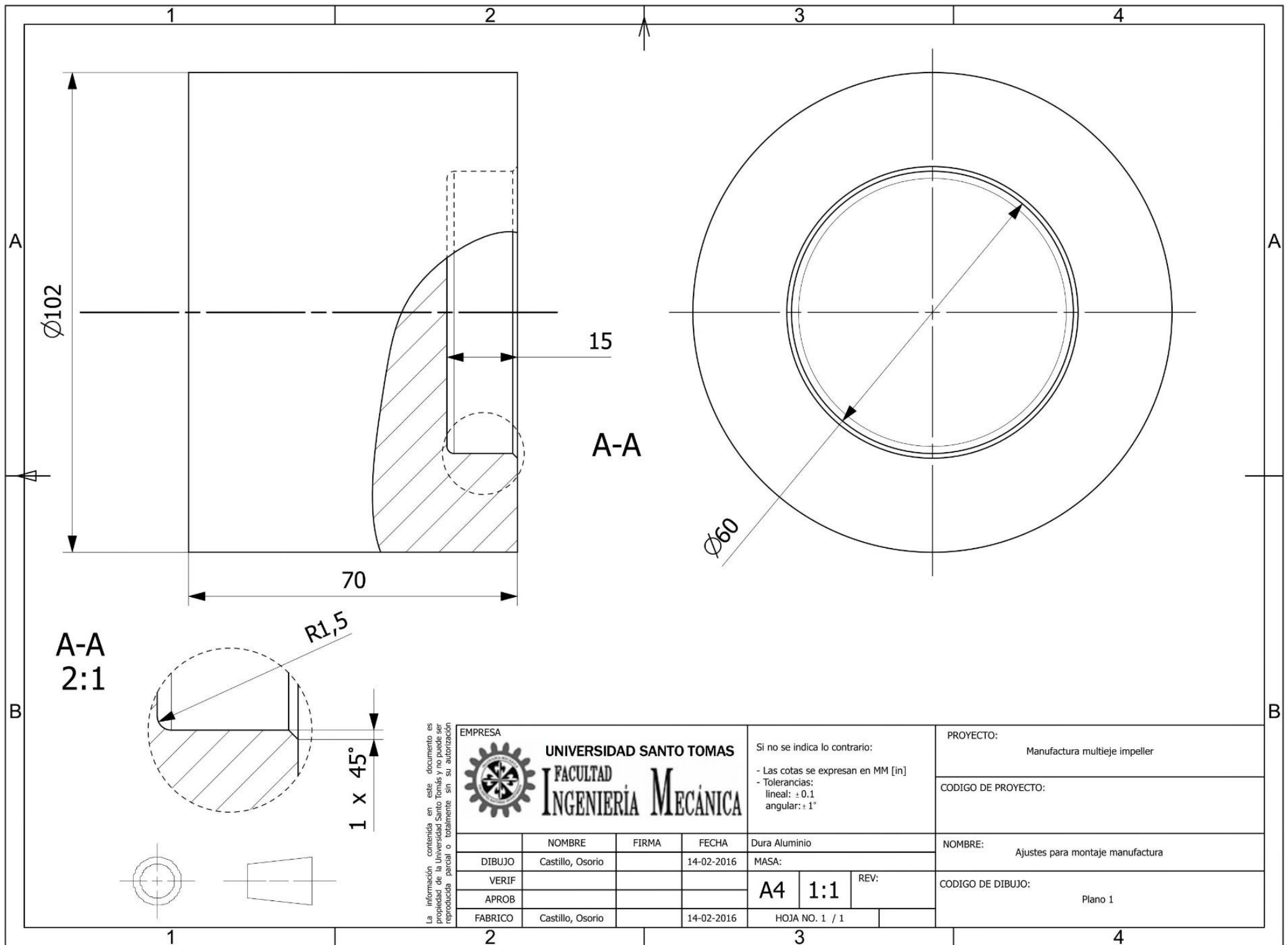
Operaciones superiores	
Ac	10 mm
Av	0.5 mm
Agujero	si/no
Da	12.7 mm
Profundidad	60 mm
Angulo de la broca	118°



La información contenida en este documento es propiedad de la Universidad Santo Tomás y no puede ser reproducida parcial o totalmente sin su autorización

EMPRESA				Si no se indica lo contrario: - Las cotas se expresan en MM [in] - Tolerancias: lineal: ± 0.1 angular: $\pm 1^{\circ}$			PROYECTO: Manufactura multieje Impeller	
 UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS FACULTAD INGENIERÍA MECÁNICA							CODIGO DE PROYECTO:	
	NOMBRE	FIRMA	FECHA	MATERIAL: Dura-aluminio			NOMBRE:	
DIBUJO	Castillo,Osorio		14-02-2016	MASA:			impeller	
VERIF				A3 1:1			CODIGO DE DIBUJO: Plano 3	
APROB								
FABRICO	Castillo,Osorio		14-02-2016	HOJA NO. 1 / 1		REV:		





La información contenida en este documento es propiedad de la Universidad Santo Tomás y no puede ser reproducida parcial o totalmente sin su autorización

EMPRESA



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD
INGENIERÍA MECÁNICA

Si no se indica lo contrario:

- Las cotas se expresan en MM [in]
- Tolerancias:
lineal: ± 0.1
angular: $\pm 1^\circ$

PROYECTO:

Manufactura multiteje impeller

CODIGO DE PROYECTO:

NOMBRE:

Ajustes para montaje manufactura

CODIGO DE DIBUJO:

Plano 1

	NOMBRE	FIRMA	FECHA
DIBUJO	Castillo, Osorio		14-02-2016
VERIF			
APROB			
FABRICO	Castillo, Osorio		14-02-2016

Dura Aluminio

MASA:

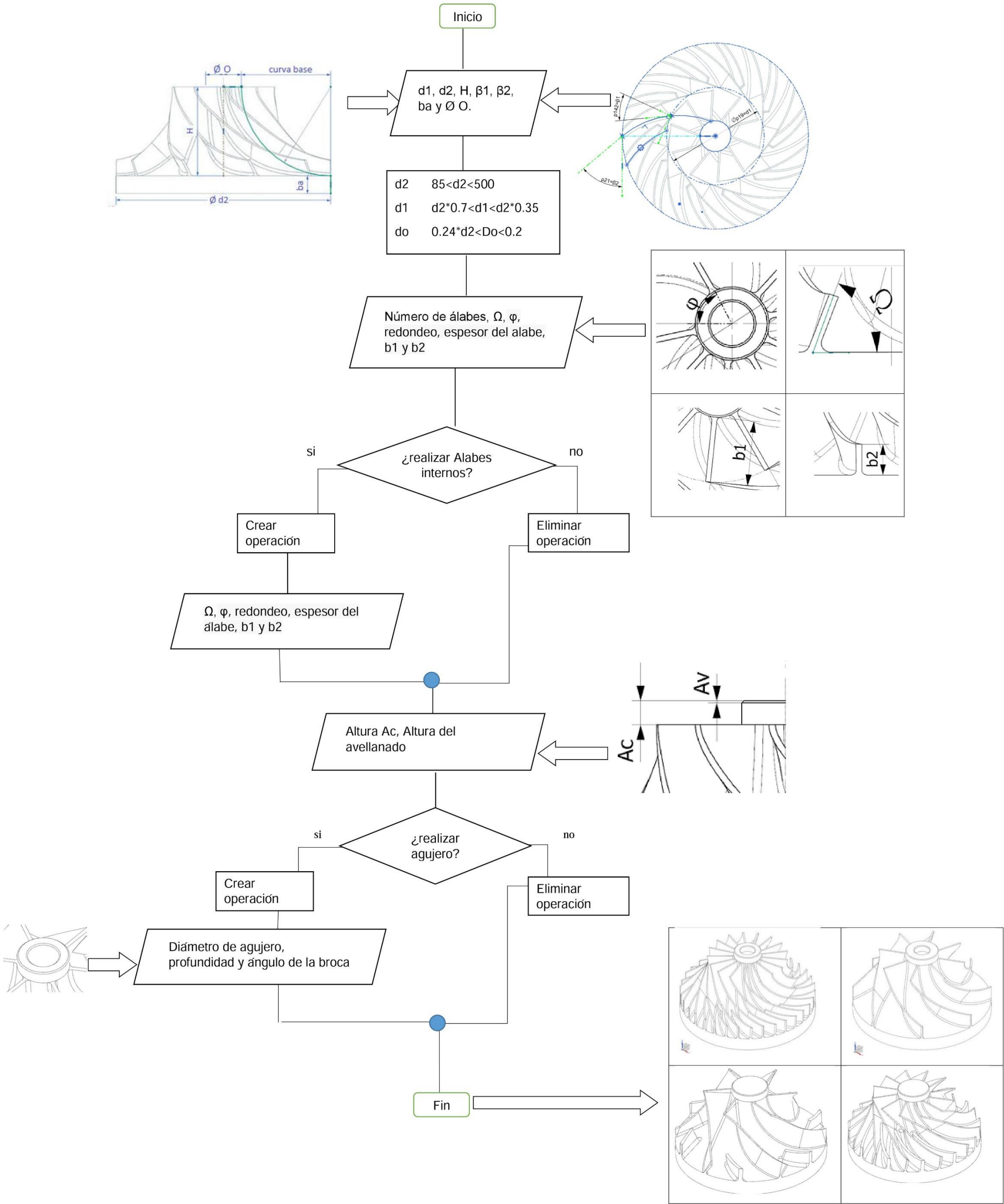
A4

1:1

REV:

HOJA NO. 1 / 1

	UNIVERSIDAD SANTO TOMAS DIVISIÓN DE INGENIERIAS FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA	
PARAMETRIZACIÓN CAD	FLUJOGRAMA	



ANEXO

	UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS DIVISIÓN DE INGENIERÍAS FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA	
Manufactura	FLUJOGRAMA	

