



*Tecnología de mecanizado para elementos de geometría compleja mediante el trabajo de 5 ejes simultáneos*

*Machining technology for complex geometry elements through the work of 5 simultaneous axes*

*Tecnologia de usinagem de elementos de geometria complexa através do trabalho de 5 eixos simultâneos*

Mirella Carolina Medina Moreno <sup>I</sup>  
[mirella.medina@esPOCH.edu.ec](mailto:mirella.medina@esPOCH.edu.ec)  
<https://orcid.org/0000-0002-1286-9235>

Miguel Ángel Escobar Guachambala <sup>II</sup>  
[maescobar@esPOCH.edu.ec](mailto:maescobar@esPOCH.edu.ec)  
<https://orcid.org/0000-0002-9683-1479>

Luis Santiago Choto Chariguamán <sup>III</sup>  
[lchoto@esPOCH.edu.ec](mailto:lchoto@esPOCH.edu.ec)  
<https://orcid.org/0000-0003-0655-2503>

Edwin Rodolfo Pozo Safla <sup>IV</sup>  
[edwin.pozo@esPOCH.edu.ec](mailto:edwin.pozo@esPOCH.edu.ec)  
<https://orcid.org/0000-0002-8931-3577>

**Correspondencia:** [mirella.medina@esPOCH.edu.ec](mailto:mirella.medina@esPOCH.edu.ec)

Ciencias de la Educación  
Artículo de Investigación

\* **Recibido:** 23 de noviembre de 2022 \* **Aceptado:** 12 de diciembre de 2022 \* **Publicado:** 23 de enero de 2023

- I. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Mecánica, Riobamba, Ecuador.
- II. Ingeniero Mecánico, Magíster en Diseño, Producción y automatización industrial Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Mecánica, Carrera de Mecánica, Grupo de Investigación GIEBI, Chimborazo – Ecuador.
- III. Ingeniero Automotriz, Master en Manufactura y Diseño Asistidos por Computador, Diplomado en Ingeniería de la Soldadura, Carrera de Mantenimiento Industrial, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Grupo de Investigación GIEBI, Chimborazo, Ecuador.
- IV. Ingeniero Mecánico, Magíster en Diseño, Producción y automatización industrial Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Mecánica, Carrera de Ingeniería Automotriz, Grupo de Investigación GIEBI, Chimborazo – Ecuador.



## Resumen

El presente proyecto técnico tuvo como objetivo evaluar la tecnología de mecanizado para elementos de geometría compleja mediante el trabajo de 5 ejes simultáneos siendo esta tecnología poco desarrollada en el país debido a que no se cuenta con softwares adecuados, así como el personal calificado para su manejo. Mediante el uso de la máquina fresadora CNC de 5 ejes ROMI DCM 620- 5X ubicada en el laboratorio “CAD CAM CAE” de la facultad de Mecánica, se realizó el mecanizado de un impeller siendo esta una geometría compleja, definiéndola como aquella que a simple vista se la considera rara debido a que no está formada por geometrías sencillas como cubos, cilindros que son desarrollables y la esfera como no desarrollable, teniendo así una dificultad en el mecanizado. El control de la máquina se lleva a cabo mediante el control numérico SIEMENS SINUMERIK 840D mediante el cual es posible la lectura e interpretación del código G obtenido mediante el post procesador compatible, una vez que se ha realizado la simulación en el software para comprobar si las herramientas escogidas son las adecuadas, además el control de velocidad y posición de los 5 ejes. Concluyendo que los resultados obtenidos en el mecanizado del impeller son satisfactorios dado que al comparar con los valores del modelo CAD, se encuentra dentro del rango de desviación permitida mediante la norma IEC 6019; logrando realizar los seis álabes con sus respectivos partidores, demostrando que mediante esta tecnología es posible su mecanizado en un solo montaje en tiempos cortos y la notable disminución de errores debido a la falla humana, se recomienda revisar el manual de la máquina y el uso de equipos de protección personal para su manejo, así como el herramental y sistema de sujeción adecuado para un correcto mecanizado.

**Palabras Clave:** Impeller; Geometría Compleja; Cinco ejes simultáneos; Manufactura; Control Numérico Computarizado.

## Abstract

The objective of this technical project was to evaluate the machining technology for elements of complex geometry through the work of 5 simultaneous axes, this technology being little developed in the country due to the fact that there is no adequate software, as well as qualified personnel for its management. . By using the ROMI DCM 620-5X 5-axis CNC milling machine located in the "CAD CAM CAE" laboratory of the Faculty of Mechanics, the machining of an impeller was carried out, this being a complex geometry, defining it as one that simply Vista is considered rare

because it is not formed by simple geometries such as cubes, cylinders that are developable and the sphere as non-developable, thus having a difficulty in machining. The control of the machine is carried out by means of the numerical control SIEMENS SINUMERIK 840D through which it is possible to read and interpret the G code obtained by means of the compatible post processor, once the simulation has been carried out in the software to check if the chosen tools are adequate, in addition to the control of speed and position of the 5 axes. Concluding that the results obtained in the machining of the impeller are satisfactory since when compared with the values of the CAD model, it is within the range of deviation allowed by the IEC 6019 standard; managing to make the six blades with their respective splitters, demonstrating that through this technology it is possible to machine them in a single assembly in short times and the notable decrease in errors due to human error, it is recommended to review the manual of the machine and the use of personal protective equipment for its handling, as well as the appropriate tooling and clamping system for correct machining.

**Keywords:** impeller; Complex Geometry; Five simultaneous axes; Manufacture; Computerized numeric control.

## Resumo

O objetivo deste projeto técnico foi avaliar a tecnologia de usinagem de elementos de geometria complexa através do trabalho de 5 eixos simultâneos, sendo esta tecnologia pouco desenvolvida no país devido ao fato de não haver software adequado, bem como pessoal qualificado para sua gestão. Utilizando a fresadora CNC ROMI DCM 620-5X de 5 eixos localizada no laboratório "CAD CAM CAE" da Faculdade de Mecânica, foi realizada a usinagem de um rotor, sendo este uma geometria complexa, definindo-o como aquele que simplesmente Vista é considerada rara por não ser formada por geometrias simples como cubos, cilindros que são desenvolvíveis e a esfera como não desenvolvíveis, tendo assim uma dificuldade na usinagem. O controle da máquina é realizado por meio do controle numérico SIEMENS SINUMERIK 840D através do qual é possível ler e interpretar o código G obtido por meio do pós-processador compatível, uma vez realizada a simulação no software para verificar se as ferramentas escolhidas forem adequadas, além do controle de velocidade e posição dos 5 eixos. Concluindo que os resultados obtidos na usinagem do impulsor são satisfatórios visto que quando comparado com os valores do modelo CAD encontra-se dentro da faixa de desvio permitida pela norma IEC 6019; conseguindo fazer as seis

pás com seus respectivos divisores, demonstrando que através dessa tecnologia é possível usinas em uma única montagem em curtos tempos e a notável diminuição de erros por falha humana, recomenda-se a revisão do manual da máquina e o uso de equipamentos de proteção individual para seu manuseio, bem como ferramental adequado e sistema de fixação para correta usinagem.

**Palavras-chave:** impulsor; Geometria Compleja; Cinco eixos simultâneos; Fabricação; Controle numérico computadorizado.

## Introducción

En Ecuador la tecnología de máquinas y herramientas multi ejes para geometrías complejas es un reto para la fabricación de piezas a nivel industrial, actualmente los problemas limitantes para el aprovechamiento al máximo de la capacidad total de las máquinas CNC son: (1) La utilización de softwares de alta gama para el desarrollo de la simulación, debido a su elevado costo. (2) No se cuenta con el personal calificado para el manejo de la tecnología multi eje. En la industria ecuatoriana ha crecido la demanda de componentes mecánicos que por su geometría no es posible realizarlo con máquinas convencionales. Con un centro de mecanizado 5 ejes y un software apropiado es posible desarrollar piezas con formas complejas, en una variedad de aplicaciones en la industria como máquinas, biomecánica, moldes de inyección, industria aeronáutica, etc.,

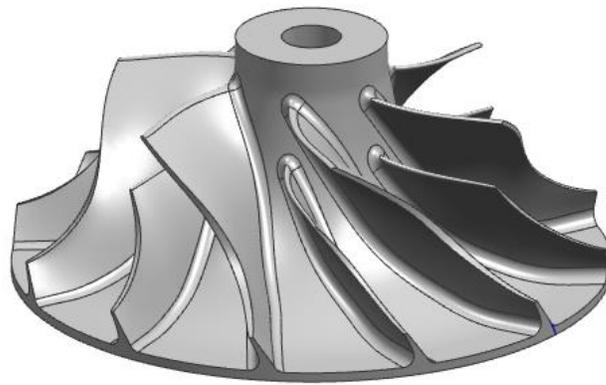
En la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, se dispone de un centro de mecanizado CNC de 5 ejes, ha sido limitado el uso de esta tecnología por la falta de conocimiento tanto de la máquina como del software que permita realizar la simulación del proceso con su respectivo post procesador que sea capaz de reconocer el código. El principal objetivo de este trabajo de titulación es realizar el mecanizado del impeller haciendo uso de las herramientas disponibles y recursos tanto físicos y tecnológicos.

## Metodología

Para el desarrollo del proceso de mecanizado se determinan las especificaciones de la pieza, el centro de mecanizado y los materiales utilizados. Luego las operaciones de maquinado requeridas para producir la pieza final. A continuación, se explican las herramientas necesarias para cada actividad. Finalmente, se determinan los parámetros de corte de las herramientas seleccionadas en función de la velocidad de corte y avance.

### *Pieza*

La pieza para mecanizar se trata de un impeller, el cual está compuesto por seis álabes principales con sus respectivos partidores. Por su geometría en las superficies se generan las diferentes operaciones y trayectorias de herramientas teniendo que ser identificadas correctamente para seleccionar las herramientas que pueden realizar las operaciones sin ninguna dificultad de mecanizado evitando choques con el material y falta de entrada de la herramienta en ciertos agujeros.



*Figura 1: Forma geométrica*

Realizado por: Medina M, 2022

### *Centro de Mecanizado*

La fresadora CNC de 5 ejes de la marca ROMI, con capacidad para desarrollar el mecanizado mediante el trabajo de 5 ejes. Diferenciado de un centro de mecanizado común por sus dos ejes de movimiento (B, C) complementarios que brindan la posibilidad de desarrollar trabajos complejos. Y debido a la indexación de estos ejes se puede generar mecanizados imposibles de ser alcanzados en centros de mecanizado convencionales.

*Figura 2: ROMI DCM 620-5X*

Fuente: (ROMI, 2016)

Sus principales especificaciones son las siguientes:

**Tabla 1:** Especificaciones ROMI DCM 620-5x

<b>Cabezal Vertical</b>	
Cono del husillo	40 ISO
Rango de velocidad	10 a 10000 rpm
<b>Avances</b>	
Avance rápido (ejes X/Y/Z)	36 m/min
Avance de corte programable	1 a 20000 mm/min
Rotación máxima de los ejes B y C	12 rpm
<b>Recorrido</b>	
Recorrido del eje X	620 mm
Recorrido del eje Y	520 mm
Recorrido del eje Z	460 mm
Distancia entre nariz del husillo y mesa	150 ~ 610 mm
Ángulo de rotación eje B	-110°~ +110°
Ángulo de rotación eje C	360°

Fuente: (ROMI, 2016)

*Material*

El material para mecanizar es madera (laurel), su dureza es baja (7 HB), lo que permite mecanizarlo con facilidad (altas velocidades de corte y de avance). Permitiendo seleccionar los datos de corte de cada herramienta Sandvik, puesto que los valores de estos dependen del tipo de material.

### *Operaciones de mecanizado*

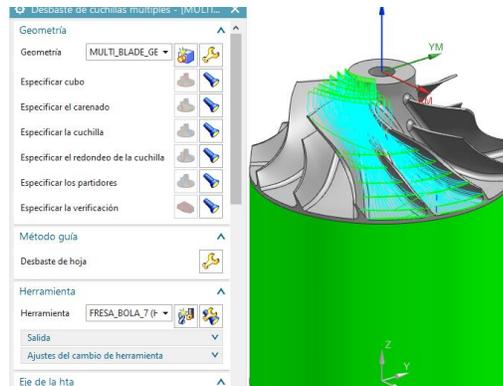
Para realizar el mecanizado correctamente, es necesario definir las operaciones a realizar, así como el orden de estas en función de las necesidades de la pieza, el material, y el centro de mecanizado disponible.

#### *1. Cavity Mill*

Permite el desbaste por antonomasia, esta operación necesita definir el material en bruto y de la pieza a mecanizar, estableciendo niveles de corte a distintas alturas y en cada nivel de corte. La operación mecaniza la diferencia entre el material en bruto y la pieza de corte.

#### *2. Desbaste de cuchillas múltiples.*

Esta operación de fresado con los ejes múltiples consiste en quitar el material que se encuentra entre las cuchillas y los partidores mediante el uso de niveles de corte entre el eje y el cubo



**Figura 3: Desbaste de cuchillas múltiples**

Realizado por: Medina M, 2022

#### *3. Acabado de los álabes primarios y partidores*

Permite realizar el acabado de los álabes principales y sus partidores especificando qué caras cortar, así como los parámetros de estabilización del eje de la herramienta para los bordes.

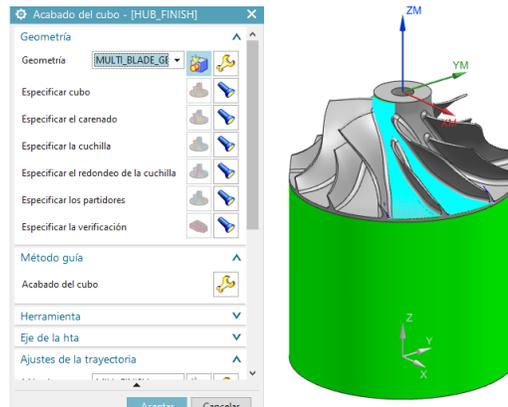


Figura 4: Acabado de los álabes y partidores

Realizado por: Medina M, 2022

#### 4. Acabado del cubo

Crea trayectorias de herramienta optimizadas al controlar con toda precisión el espaciado lateral, el patrón de corte y el suavizado de la trayectoria de la herramienta.



Realizado por: Medina M, 2022

Figura 5: Acabado del cubo

#### 5. Acabado con redondeo de la cuchilla principal y partidor

Para terminar como última operación, se realiza un redondeado entre el cubo y los alabes para evitar zonas de interferencia, así mismo esta operación permite dar redondeado a la zona del alabe y su respectivo partidor.

No es posible realizar simultáneamente la operación en el alabe y el partidor, para ello se requiere una nueva operación similar cambiando únicamente el método guía.



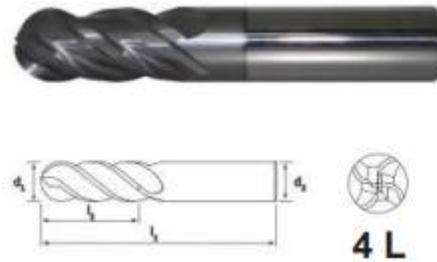
Realizado por: Medina M, 2022

### Selección de herramientas

Una vez conocidas las operaciones que hay que realizar a la pieza, es necesario seleccionar las herramientas en función de las características de la máquina (CNC), de la pieza y del material. Se han tomado las velocidades recomendadas por el catálogo del fabricante teniendo también en cuenta el material en cuestión y la geometría a mecanizar.

- Fresa de punta redonda de diámetro 12 mm

La primera operación que se realiza a la pieza es un perfilado, esto es debido a que es necesario obtener la forma de la pieza en bruto. Se lo hace mediante una fresa de punta esférica de 12 mm de diámetro.

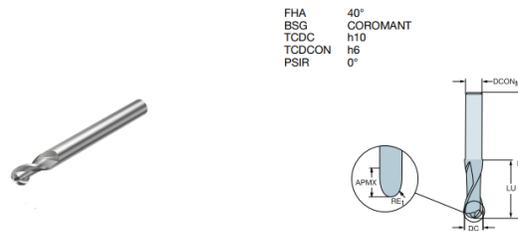


**Figura 7:** Fresa redonda 12 mm

**Fuente:** Catálogo FERMEC

- Fresa de punta redonda de diámetro 6 mm

Con el fin de realizar un desbaste sin provocar colisiones, la herramienta adecuada para este tipo de operaciones, por su forma geométrica pudiendo realizar un acabado completo lo cual se lo debe hacer por secciones con el fin avanzar con la mayor cavidad posible, una vez realizado la operación de desbaste con la misma herramienta en este caso se ha definido la herramienta “SANVIK con su numeración 2B320-0600-NG”, para el desbaste.



**Figura 8:** Fresa redonda 6 mm

**Fuente:** Catálogo SANDVIK

- Fresa cónica con punta redonda con diámetro de 4 mm

Para el redondeado de los alabes y los alabes divisores se seleccionó una herramienta cónica con punta redonda de 4 mm, apta para realizar la operación de redondeo. Esta herramienta es de la marca “SANVIK con su numeración R216.53-0404RAL40G”.

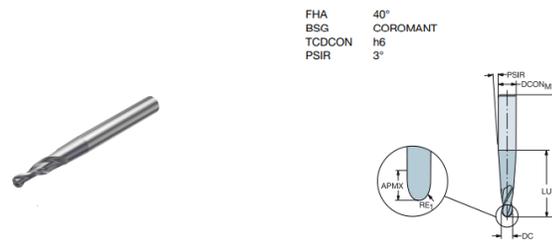


Figura 9: Fresa cónica con punta redonda 4 mm

Fuente: Catálogo SANDVIK

## Resultados y discusión

### Simulación

La simulación con máquinas es un paso fundamental antes de la fabricación en la máquina real, este procedimiento se lo hace para el mecanizado CNC, en este caso se ha propuesto el mecanizado del impeller, para este procedimiento el software NX CAM brinda muchas facilidades para obtener este tipo de mecanizado multiejes, debido a esto se ha realizado todos los parámetros de operaciones y ha procedido a realizar la respectiva simulación, una vez realizada el montaje del material en bruto adecuado, como se muestra en la siguiente figura el montaje y la sección a mecanizar.

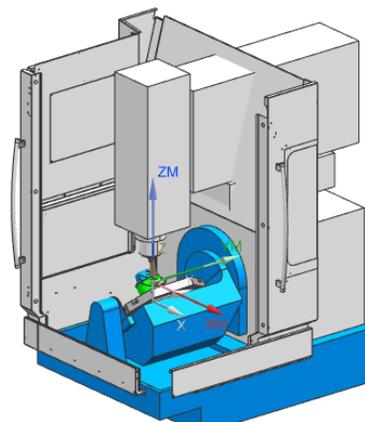


Figura 10: Simulación del mecanizado

Realizado por: Medina M, 2022

### Código G

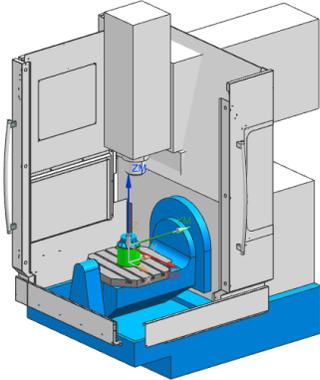
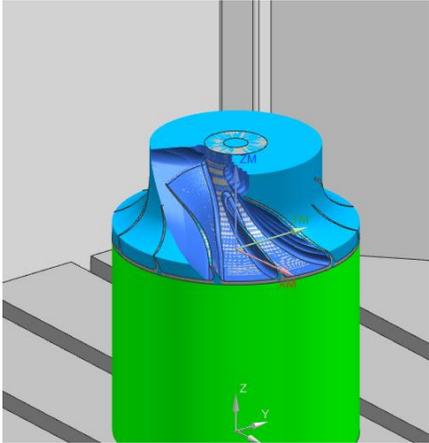
Previo a obtener el código es necesario el 3D de la máquina específica “ROMI 620-5X el cual facilita la configuración para el diseño de un post procesador específico para el tipo de máquinas con las configuraciones necesarias.

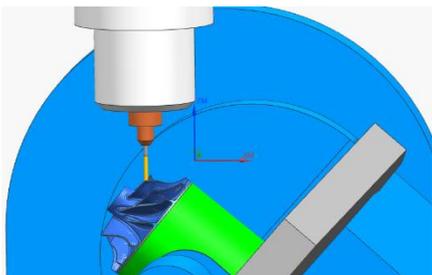
La generación del código se la realiza en la pestaña de diseño y a su vez seleccionando el post procesador a utilizar específicamente para una máquina de cinco ejes, este Post procesador es mucho más complejo que para una CNC de 3 ejes.

```
N10 ;Start of Program
N70 G40 G17 G710 G94 G90 G60 G601 FNORM
N120 ;
N130 ;Operation : MULTI_BLADE_ROUGH
N140 ;
N180 ;Second Tool
N190 T2
N200 M6
N202 R1=4000
N204 R2=4000
N210 MSG("MILL_ROUGH")
N250 ;Initial Move
N260 G0 B60. C305.
N270 TRAORI
N280 CYCLE832(10,3,1)
N300 G54
N310 G0 X85.314 Y-62.102 Z-9.104 S2000 D1 M3
N320 ;Approach Move
N330 X83.204 Y-60.589 Z-9.776
```

**Figura 11:** Código G

Realizado por: Medina M, 2022

<p>Simulación del montaje de la pieza en bruto en la CNC 5 ejes</p>	<p>Montaje de la pieza en bruto en la CNC 5 ejes</p>
 <p><b>Figura 12</b> Realizado por: Medina M, 2022</p>	 <p><b>Figura 13</b> Realizado por: Medina M, 2022</p>
<p>Simulación de mecanizado de un álabe</p>	<p>Mecanizado de un álabe</p>
 <p><b>Figura 14</b> Realizado por: Medina M, 2022</p>	 <p><b>Figura 15</b> Realizado por: Medina M, 2022</p>
<p>Simulación de la primera herramienta</p>	<p>Mecanizado de la primera herramienta</p>



**Figura 16**

Realizado por: Medina M, 2022

Simulación de la segunda herramienta

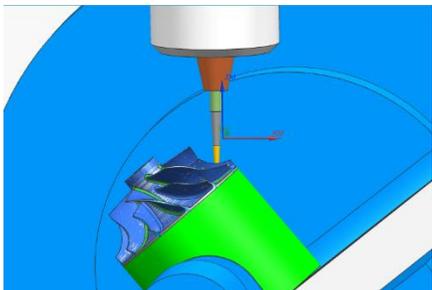


**Figura 17**

Realizado por: Medina M, 2022

Mecanizado de la segunda herramienta

Realizado por: Medina M, 2022



**Figura 18**

Realizado por: Medina M, 2022

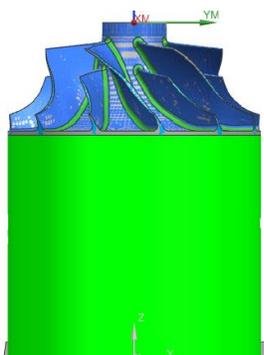
Simulación completa



**Figura 19**

Realizado por: Medina M, 2022

Mecanizado completo



<p style="text-align: center;"><i>Figura 20</i></p> <p>Realizado por: Medina M, 2022</p>	<p style="text-align: center;"><i>Figura 21</i></p> <p>Realizado por: Medina M, 2022</p>
------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------

### *Toma de medidas*

Previo a la toma de medidas, el reloj comparador se ubica de forma perpendicular a la mesa coordenada, soportado en una base magnética sujeta a una parte sin movimiento de la fresadora y obtener así un punto de apoyo fijo que impida el movimiento del reloj comparador, a medida que se desplace por la superficie de la tapa superior.

Al momento que la mesa coordenada avanza, desde el diámetro exterior hacía el centro del impeller con un  $\Delta x = 5 \text{ mm}$ , el reloj comparador capta la variación de altura en la superficie obteniendo así los datos geométricos



**Figura 22:** Toma de medidas

Realizado por: Medina M, 2022

**Tabla 2** Toma de medidas con el reloj comparador

Dato	Avance de mesa	Avance de mesa	Avance de mesa
------	----------------	----------------	----------------

	coordenada X (mm)	coordenada Y (mm)	coordenada Z (mm)
1	0	0	0
2	5	0.86	0.005
3	10	1.78	0.010
4	15	2.67	0.005
5	20	3.45	0.010
6	25	4.68	0.05
7	30	6.51	0.059
8	35	7.36	0.012

Realizado por: Medina M, 2022

El calibrador se empleó en la medición de escalones, espesores, profundidades y diámetros mayores, menores, externos e internos.

**Tabla 3:** Toma de medidas con calibrador

Medidas	mm	Desviación estándar
Diámetro mayor	176.03	0.00017
Diámetro menor exterior	44.68	0.007
Alabe	61.18	0.0014
Partidor	42.34	0.008
Espesor álabe	3.01	0.003
Espesor partidor	2.99	0.003

Realizado por: Medina M, 2022

### *Evaluación de la calidad*

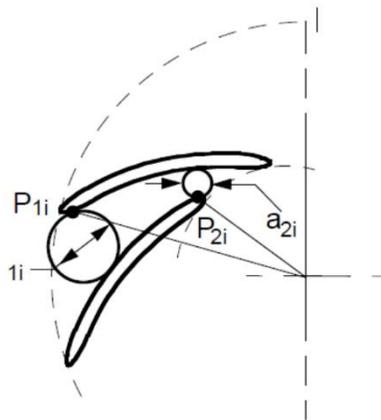
El mecanizado del impeller debe garantizar la similitud geométrica entre el modelo digital y el modelo real, como mínimo en las geometrías más influyentes de la pieza.

Para evaluar que se cumpla la similitud geométrica, se empleó el método de evaluación planteado en la norma IEC 60193, este es un método simple y práctico el cual dicta que con el trazado dimensional de algunas geometrías se garantiza la similitud geométrica entre el modelo digital y el físico.

### *Comparación tridimensional entre el impeller real y digital*

Las geometrías que se miden son el ancho entre álabes y el diámetro de referencia, ya que estas son las dos geometrías más críticas durante el desarrollo de la modelación, debido a la especulación en la definición de la geometría de los álabes.

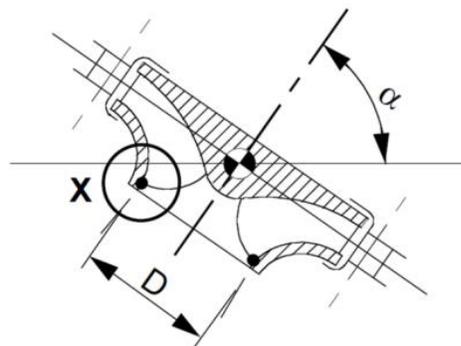
El ancho entre los álabes se mide tomando dos diámetros del espacio entre ellos, tomando como puntos de referencia, la parte inicial de uno y la parte final del otro.



**Figura 23:** Ancho entre álabes

Fuente: Norma IEC 60193

El diámetro de referencia se mide en la parte del impulsor que corresponde a la entrada del fluido cuando éste opera como bomba, tomando el diámetro desde el inicio del alabe en la parte superior.



**Figura 24:** Diámetro de referencia

Fuente: Norma IEC 60193

Las desviaciones permitidas por la norma IEC 60193 se emplean para comparar las desviaciones que se obtienen de las geometrías del modelo real y el modelo digital del impeller y concluir si la norma se cumple o no.

**Tabla 4:** Desviaciones permitidas

	Desviación permitida
Ancho de entrada y ancho de salida $a_{1i}$ y $a_{2i}$	+3 % -1
Diámetro de referencia $D$	$\pm 0.2\%D$

Fuente: Norma IEC 60193

**Tabla 5:** Desviación resultante

Medida	Modelo real	Modelo digital	Desviación permitida	Desviación resultante
ancho de salida $a_{1i}$	35.43	35	+3 % -1	0.021%
ancho de salida $a_{2i}$	8.02	8	+3 % -1	-0.024%
Diámetro de referencia $D$	44.68	45	$\pm 0.2\%D$	0.015%

Realizado por: Medina M, 2022

## Conclusiones

Con la tecnología del centro de mecanizado con el que cuenta universidad se demostró que realmente se pueden realizar operaciones en 5 ejes simultáneos el cual permite la fabricación de distintas formas complejas. El software NX trae diferentes operaciones para el mecanizado multi eje el cual permitió establecer diferentes estrategias para el desarrollo de los procesos de manufactura del impeller siendo esta una pieza bastante compleja por su geometría.

Para el diseño, simulación y mecanizado se recopiló información sobre el funcionamiento y operación de fresadoras y prototipos de fresadoras de 5 ejes de Control Numérico Computarizado, siendo posible el contacto con técnicos de Brasil de la marca ROMI.

Para el desarrollo del mecanizado fue indispensable el uso de la máquina virtual desarrollada, 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 estimando 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.

Los resultados obtenidos en el mecanizado del impeller son satisfactorios dado que al comparar con los valores del modelo CAD, se encuentra dentro del rango de desviación permitida; logrando además realizar los seis álabes con sus respectivos partidores

## Referencias

1. BOLIVAR, F. Módulo control numérico computarizado. [en línea].2012, pp. 143. Disponible en:[https://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/36987933/Modulo\\_Control\\_Numerico\\_Computarizado.pdf?AWSAccessKeyId=AKIAIWOWYYGZ2Y53UL3A&Expires=1549322967&Signature=s2vnMB2i7Q8aSR44VK6BRdrZxME%3D&response-content-disposition=inline%3B filename%3DMODULO\\_C](https://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/36987933/Modulo_Control_Numerico_Computarizado.pdf?AWSAccessKeyId=AKIAIWOWYYGZ2Y53UL3A&Expires=1549322967&Signature=s2vnMB2i7Q8aSR44VK6BRdrZxME%3D&response-content-disposition=inline%3B filename%3DMODULO_C).
2. BUSTILLOS, D. y COQUE, K. Diseño y Construcción de un Prototipo de Centro de Mecanizado Vertical CNC de 5 Ejes para el Laboratorio CNC de la ESPE Extensión Latacunga. (2014), pp. 3.
3. CASTILLO C y OSORIO A, . Desarrollo del proceso de manufactura de un impeller en un centro de mecanizado multieje empleando software NX CAM. S.l.: s.n.
4. ESTREMS, M., 2007. Principios de Mecanizado y Planificación de Procesos. Universidad de Cartagena, vol. I, (2016), pp. 7-107.
5. GÓMEZ, G. y TUBÓN, W., Modelado CAD-CAM y fabricación de un avión de juguete utilizando una máquina CNC de 5 ejes que formará parte del laboratorio de CAD-CAM de la Escuela de Ingeniería Industrial. [en línea] 2017 .

6. GONZÁLEZ, H., CALLEJA, A., LAMIKIZ, A. y DE LACALLE, L.N.L., Manufacturing processes of integral blade rotors for turbomachinery, processes and new approaches. Applied Sciences (Switzerland), vol. 10, no. 9, (2020) pp. 1-22. ISSN 20763417. DOI 10.3390/app10093063.
7. GREGORIO, J. y BELTR, B., APLICACIONES MÉDICAS. S.l.: s.n.
8. Introducción al CAD CAM. [en línea], 2014. [Consulta: 28 noviembre 2022]. Disponible en: <https://lenguajedeingenieria.files.wordpress.com/2013/02/introduccion-al-cad-cam.pdf>.
9. LASEMI, A., XUE, D. y GU, P., Recent development in CNC machining of freeform surfaces: A state-of-the-art review. CAD Computer Aided Design, vol. 42, no. 7, (2010) pp. 641-654. ISSN 00104485. DOI 10.1016/j.cad.2010.04.002.
10. MEZA, JORGE; GAVILANEZ, C., Modelado CAD-CAM y fabricación de un prototipo de busto humano, utilizando un router cnc multieje. (2018)
11. PÉREZ, S, Modelación Geométrica Del Impulsor De Una Bomba Centrifuga. (2010)
12. ROJAS, O. y SALAS, J., [en línea]. 1999 Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=81611271010>.
13. ROMI. Línea Romi Dcm 620. [en línea]. 2016 Disponible en: [https://www.romi.com/wp-content/uploads/2016/02/cat\\_romi\\_dcm620\\_es\\_aj\\_01\\_-\\_062016\\_baixa.pdf](https://www.romi.com/wp-content/uploads/2016/02/cat_romi_dcm620_es_aj_01_-_062016_baixa.pdf).
14. SIEMENS. SINUMERIK 840D Manual, Tool and Mold Making. (2007).
15. SIEMENS. Milling Technology Manual. (2022).
16. SINUMERIK, S. Fundamentos de programación. (2009)
17. TALAVERA, M., 1. Aplicaciones CAD/ CAM/ CAE. (2018).