



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

**FABRICACIÓN DEL PROTOTIPO DE UN ROTOR RADIAL INFLOW
PARA UNA MICROTURBINA EN ALEACIÓN 6061 POR EL
PROCESO DE CERA PERDIDA**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERA QUÍMICA METALÚRGICA

PRESENTA

ANA KAREN HERNÁNDEZ GONZÁLEZ



CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX. 2019



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: **Profesor:** **GARCÍA HINOJOSA JOSE ALEJANDRO**

VOCAL: **Profesor:** **SANCHEZ SANTIAGO ARTURO ALEJANDRO**

SECRETARIO: **Profesor:** **ESCOBAR MEJIA LUIS DARIO**

1er. SUPLENTE: **Profesor:** **DELGADO ALVAREZ JOSE ALFREDO**

2° SUPLENTE: **Profesor:** **QUIROGA HERRERA HECTOR ISRAEL**

CIUDAD UNIVERSITARIA, FACULTAD DE QUÍMICA, EDIFICIO D, UNAM

CIUDAD DE MÉXICO

ASESOR DEL TEMA:

Dr. Alejandro Garcia Hinojosa

SUSTENTANTE:

Ana Karen Hernández González

AGRADECIMIENTOS

Al CEMIE-GEO proyecto 207032 CONACYT/SENER por darme la oportunidad de colaborar en el desarrollo de proyectos para fomentar el uso de las energías alternas.

Contenido

Objetivos.....	9
Introducción.....	10
Capítulo 1 Antecedentes.....	11
1.1. Geotermia.....	11
1.1.1. Tipos de recursos de la energía geotérmica.....	12
1.1.2. Aplicaciones de la energía geotérmica.....	13
1.1.2.1. Usos directos.....	13
1.1.2.2. Generación eléctrica.....	14
1.1.2.3. Generación eléctrica con baja entalpía.....	15
1.2. Turbinas de vapor.....	16
1.2.1. Microturbinas para Ciclos Binarios.....	17
1.2.2. Selección de la microturbina.....	18
Capítulo 2 Proceso de manufactura para rotores.....	20
2.1. Maquinado por Control Numérico Computarizado (CNC).....	20
2.2. Fabricación Digital.....	21
2.2.1. Sinterizado láser selectivo.....	22
2.2.2. Micro-sinterizado láser.....	22
2.2.3. Fundición selectiva láser.....	23
2.2.4. Revestimiento láser.....	24
2.2.5. Deposición de metal por láser.....	25
2.2.6. Impresión tridimensional.....	26
2.3. Fundición.....	27
2.3.1. Moldeo arena en verde.....	27
2.3.2. Moldeo a presión.....	28
2.3.3. Molde permanente.....	29
Capítulo 3 Principales variables en el proceso de cera perdida.....	31
3.1. Preparación del patrón.....	32
3.2. Ensamblaje del árbol de cera.....	32
3.3. Construcción de la cáscara cerámica.....	33
3.4. Proceso de descerado.....	34
3.5. Colado y acabado.....	34

3.6. Selección material para fundición del rotor.	36
Capítulo 4 Proceso de fundición a la cera perdida.	38
4.1. Generación de los prototipos 3D.	38
4.2. Generación de la matriz en silicón.	40
4.3. Patrón en cera.	41
4.4. Diseño sistema de colada y alimentadores.	42
4.4.1. Cálculo de módulo de solidificación.	44
4.5. Recubrimiento refractario.	51
4.6. Descerado y sinterizado molde cerámico.	52
4.7. Fundición.	52
4.8. Limpieza de cerámico y corte.	52
4.9. Caracterización del rotor.	54
Capítulo 5 Resultados y análisis.	55
5.1. Modelo 3D y matriz.	55
5.2. Modelos en cera.	57
5.3. Capa refractaria.	59
5.4. Rotor colado y defectos.	60
5.5. Análisis metalográfico y dureza.	62
Capítulo 6 Conclusiones y trabajo futuro.	65
Capítulo 7 Referencias.	66

Lista de Figuras

Figura 1.1 Manifestación de energía geotérmica en Chile: géiser [2].....	11
Figura 1.2 Ciclo Orgánico Rankine [6].....	14
Figura 1.3 Ciclo Binario [6].	15
Figura 1.4 Turbina radial inflow [10].	17
Figura 1.5 Turbina radial outflow [11].	18
Figura 1.6 Rotor de microturbina [13].....	19
Figura 2.1 Centro de manufactura avanzada [16].	21
Figura 2.2 Técnicas de fabricación directa [17].	21
Figura 2.3 Rotor obtenido con sinterizado láser selectivo [19].	22
Figura 2.4 Rotor obtenido por micro-sinterizado láser [21].....	23
Figura 2.5 Fundición selectiva láser [23].	24
Figura 2.6 Revestimiento láser [25].	24
Figura 2.7 Deposición de metal por láser [27].	25
Figura 2.8 Impresión digital 3D.....	26
Figura 2.9 Clasificación de fundición por moldeo [28].	27
Figura 3.1 Proceso cera perdida [32].	31
Figura 4.1 CAD con dimensiones (cm) del rotor 13 álabes.	39
Figura 4.2 CAD dimensiones (cm) rotor 5 álabes.....	39
Figura 4.3 Impresión 3D rotor 13 álabes.	40
Figura 4.4 Impresión 3D rotor 5 álabes	40
Figura 4.5 Molde Silicón con una sola división.....	41

Figura 4.6 Molde de silicón.....	41
Figura 4.7 Patrón en cera de 13 álabes con defectos.	41
Figura 4.8 Patrón de cera de 13 álabes con retoques.....	41
Figura 4.9 Patrón de cera final del rotor de 13 álabes.....	42
Figura 4.10 Patrón en cera de rotor 5 álabes.	42
Figura 4.11 Diseño del sistema de colada.....	43
Figura 4.12 Consideración cuerpo del rotor	43
Figura 4.13 Diseño del sistema de colada.....	50
Figura 4.14 Árbol de cera.	51
Figura 4.15 Descerado y sinterizado de la cáscara rotor 5 álabes.....	52
Figura 4.16 Árbol sin refractario.	53
Figura 4.17 Rotor colado.....	53
Figura 4.18 Rotor 5 álabes colado.	53
Figura 5.1 Superficie prototipo rotor 3D.....	55
Figura 5.2 Sección álabes en prototipo 3D.....	56
Figura 5.3 Matriz con dos líneas de partición.....	56
Figura 5.4 Matriz con una línea de partición.....	57
Figura 5.5 Defectos modelo en cera.	58
Figura 5.6 Capas de cerámico.	59
Figura 5.7 Grietas en el molde de yeso.....	60
Figura 5.8 Rotor colado de 13 álabes.	61
Figura 5.9 Rotor colado de 5 álabes	61

Figura 5.10 Microestructura 50X de 6061 como colada, presencia de dendritas. .	63
Figura 5.11 Microestructura 100X de 6061 como colada.	63
Figura 5.12 Microestructura a 400X de 6061 como colada, presencia de precipitados.	63
Figura 5.13 Microestructura Al6061 como pieza de colada [41].	63

Lista de Tablas

Tabla 1.1 Clasificación de la geotermia dependiendo la entalpía [5].	12
Tabla 3.1 Aleaciones empleadas dependiendo de la temperatura de trabajo [37].	36
Tabla 3.2 Composición química Al 6061 [38].	36
Tabla 3.3 Propiedades mecánicas Al 6061 [38].	37
Tabla 4.1 Características aleación 6061	43
Tabla 4.2 Datos de los rotores	44
Tabla 4.3 Módulos de solidificación.	49

Objetivos.

General

- Fabricación del rotor de una microturbina radial inflow por el proceso de cera perdida a partir de un prototipo de impresión 3D.

Particular

- Obtención de una pieza prototipo de fundición de Aluminio.

Introducción.

En la actualidad se ha iniciado una mayor búsqueda por explotar de manera eficiente las energías alternas tales como la eólica, solar y geotérmica; siendo ésta última la que se ha tratado con mayor énfasis en México.

La geotermia tiene una gran cantidad de aplicaciones desde el uso de su energía en invernaderos, deshidratadores, hasta la transformación en energía eléctrica para uso de un sector pequeño de la población ubicada en las cercanías de los yacimientos geotérmicos.

El proceso de transformación en energía eléctrica se lleva a cabo a través de los ciclos orgánicos los cuales tienen como fundamento hacer pasar el vapor proveniente del yacimiento a través de una caldera, una bomba, un condensador y la parte más importante en el ciclo y en el cual se centra este trabajo: la turbina. Al tratarse de generación eléctrica a pequeña escala las turbinas reciben el nombre de microturbinas y son una tecnología relativamente nueva.

Debido a las dimensiones y características de las microturbinas, se buscó tener un diseño en 3D sobre el cual se realizaría un molde en que se pudiera tener la primera etapa del proceso de fundición a la cera perdida, basada en tener una pieza en cera que es recubierta con material refractario, de la que posteriormente es extraída la cera, razón por la que el proceso recibe este nombre, para dejar una cavidad que permita que el material fundido sea vertido, obteniendo una pieza final con una superficie lisa y gran precisión dimensional. El uso de la aleación 6061 se justifica en que tiene las mejores propiedades para poder ser modelada mediante maquinado además de soportar la corrosión a temperatura elevada.

Este trabajo corresponde al proyecto del Instituto de Ingeniería del grupo iiDEA (Instituto de Ingeniería Desalación y Energías Alternas) llamado CBEI10, con el que se pretende explotar de manera eficiente la energía geotérmica para la generación de energía eléctrica.

Capítulo 1 Antecedentes.

1.1. Geotermia.

El término geotermia se emplea para designar a la ciencia que estudia fenómenos térmicos internos del planeta, mientras que la energía geotérmica es la energía almacenada en forma de calor por debajo de la superficie sólida de la Tierra. Esta energía proveniente del núcleo de la Tierra se desplaza a través del magma y fluye por las fisuras existentes en las rocas sólidas y semisólidas de la corteza de la Tierra.

Las fuentes que dan origen a la energía geotérmica son el decaimiento radiactivo (U, Th, K,) fricción mecánica (en la base de la litosfera), convección del manto (transporte de calor a la corteza) y cristalización de magmas básicos (calor latente o de cristalización), los cuales dan como principales manifestaciones de esta energía fumarolas, manantiales termales, géiseres y volcanes como se muestra en la Figura 1.1 [1].



Figura 1.1 Manifestación de energía geotérmica en Chile: géiser [2].

1.1.1. Tipos de recursos de la energía geotérmica.

La energía geotérmica es considerada como un recurso limpio y renovable ya que el calor proveniente del interior de la Tierra es ilimitado para el ser humano. Algunos de los sistemas de los cuales se puede extraer esta energía para su aprovechamiento son:

- Sistemas hidrotermales. También llamados reservorios geotérmicos o yacimientos geotérmicos, son sistemas de agua muy caliente y/o vapor.
- Sistemas de roca seca caliente. Para poder aprovechar este sistema se requiere que circule agua a través de las rocas calientes y se forme un yacimiento geotérmico o reservorio. De no encontrarse agua, ésta se debe inyectar a alta presión para formar un reservorio artificial.
- Sistemas marinos. Se encuentran en las profundidades de los océanos.
- Sistemas geopresurizados. Son depósitos de agua y vapor junto con gas metano, almacenados a altas presiones [3].

De los sistemas geotérmicos mencionados el de mayor interés para este trabajo es el hidrotermal, en el cual sus recursos geotérmicos se pueden clasificar de acuerdo a la energía contenida en el fluido del reservorio del yacimiento geotérmico como se muestra en la Tabla 1.1. Es importante señalar que un yacimiento geotérmico es una concentración de agua que se encuentra al interior de la Tierra cerca de una fuente de calor cubierto por rocas y delimitado por fallas, de la cual se extrae el flujo en forma de vapor por medio de la perforación de pozos geotérmicos [4].

Tabla 1.1 Clasificación de la geotermia dependiendo la entalpía [5].

Yacimiento	Temperatura	Profundidad
Muy baja entalpía	$T < 30^{\circ}\text{C}$	15m
Baja entalpía	$30 < T < 90^{\circ}\text{C}$	1500-2500 m
Media entalpía	$90 < T < 150^{\circ}\text{C}$	1500-3000 m
Alta entalpía	$T > 150^{\circ}\text{C}$	2000-4000 m

1.1.2. Aplicaciones de la energía geotérmica.

Existe una amplia gama de aplicaciones para la energía geotérmica, las cuales dependen directamente de la entalpía que contenga el yacimiento. Las temperaturas inferiores a 30°C ofrecen solo calefacción con bombas de calor-climatización.

Los yacimientos de baja entalpía, temperaturas comprendidas entre los 30 y 90°C, tienen la energía suficiente para ser empleadas en piscinas, balneoterapia, acuicultura, calefacción, invernaderos; secado de productos agrícolas, maderas, pescados; deshielo, precalentamiento y en la producción de energía eléctrica en plantas de ciclo binario.

Los de media entalpía, temperaturas entre 90 y 150°C, son principalmente proveedores de energía en fábrica de conservas, secado de productos industriales, extracción de sustancias químicas, destilación de agua dulce y recuperación de metales.

Los de muy alta entalpía, que son de temperaturas mayores a 150°C únicamente pueden ser utilizados para la producción de energía eléctrica de forma convencional.

1.1.2.1. Usos directos.

Generalmente se emplean recursos de media y baja entalpía (inferiores a los 150°C y que es fácil de ubicarla entre los 1500 y 2500m) [5], para el uso directo de los recursos geotérmicos que se destinan para aplicaciones como:

- Secado de alimentos utilizando deshidratadores.
- Balneología, que son baños con agua utilizada para masajes, ejercicios o baños de barro.
- Mejora de cultivos en invernaderos, los cuales generan un ambiente con cierta humedad y temperatura en sitios donde no se tienen esas características.

1.1.2.2. Generación eléctrica.

Para aplicaciones de generación eléctrica convencional, se emplean recursos de media y alta entalpía (superiores a los 150°C, ubicados a los 3000m aproximadamente) [5]. La generación de energía eléctrica tiene su base de funcionamiento en el Ciclo Orgánico Rankine, el cual permite transformar la energía térmica de un fluido en trabajo mecánico, y consta de cuatro componentes principales: turbina, condensador, bomba y caldera, dispuestos tal como se muestra en la siguiente Figura 1.2.

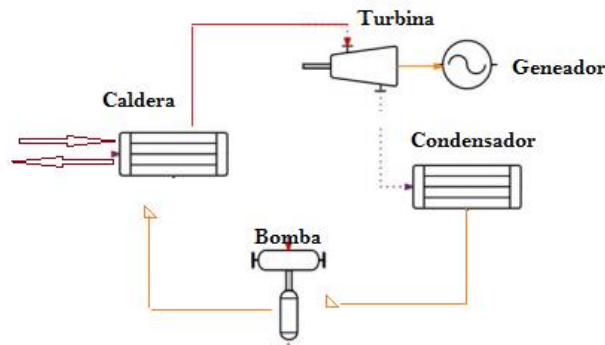


Figura 1.2 Ciclo Orgánico Rankine [6].

El Ciclo Orgánico Rankine de forma simplificada, sigue las siguientes etapas:

- El fluido de trabajo se evapora en el intercambiador de calor (caldera), donde el fluido geotérmico le cede la energía.
- El fluido de trabajo se expande (bajando su presión) en la turbina la cual mueve al generador eléctrico.
- El vapor pasa a través de un condensador (cediendo calor) para pasar a fase líquida.
- Finalmente, una bomba vuelve a presurizar el líquido y lo envía hacia la caldera iniciando nuevamente el ciclo.

1.1.2.3. Generación eléctrica con baja entalpía.

Ciclos binarios.

Para generar electricidad con fuentes de baja y media entalpía, se emplea una tecnología denominada ciclos binarios, los cuales hacen uso de un fluido de trabajo de gran peso molecular (refrigerantes) cuya presión y temperatura de condensación son muy cercanas a la del ambiente lo que lo hace ideal para el aprovechamiento de recursos de baja entalpía. Los ciclos binarios son modificaciones de ciclos Rankine convencionales los cuales utilizan dos fluidos de trabajo, por un lado, el fluido geotérmico que se introduce a un intercambiador de calor para efectuar la transferencia de calor al segundo fluido de trabajo del ciclo, es decir al refrigerante o fluido orgánico [3]. En la Figura 1.3 se muestra un esquema de un ciclo binario convencional.

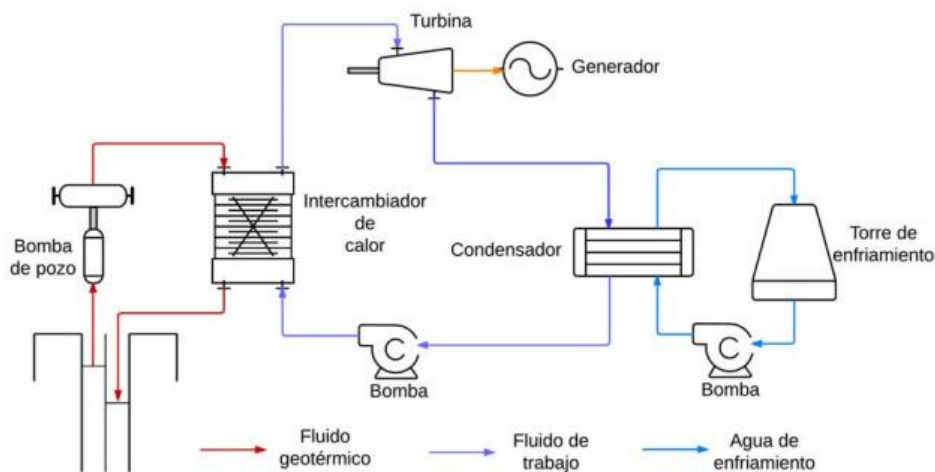


Figura 1.3 Ciclo Binario [6].

Uno de los componentes más importantes de esta tecnología es la turbina, ya que es allí donde se lleva la transformación de la energía térmica a energía mecánica y con un generador eléctrico, se transforma en energía eléctrica.

El objetivo de este trabajo se sustenta en la importancia que tiene este componente en estos ciclos de generación, por lo que se ha considerado oportuno analizar las diferentes opciones que se tienen para su fabricación, por ende, se

expondrá brevemente la clasificación de las turbinas para ciclos binarios y, de esta manera, centrar el trabajo en sólo un tipo de turbina.

1.2. Turbinas de vapor.

Una turbina de vapor es aquella que usa como fluido de trabajo o fuerza motriz vapor de agua. Ésta convierte una parte de la energía interna del vapor en potencia al pasar por la flecha. Están diseñadas para aplicaciones de generación distribuida ya que son las responsables de suministrar la energía eléctrica [7].

Existen diversos parámetros para la clasificación de las turbinas de vapor, según el tipo de vapor, la forma de aprovechamiento de la energía contenida en el flujo del vapor (reacción o acción), tipo y número de pasos o etapas (multietapa o monoetapa), condiciones bajo las cuales se admite o elimina el vapor, con referencia a la operación y uso, por la presión de salida del vapor (contrapresión, escape libre o condensación), o de acuerdo a la dirección del flujo en su paso por el rotor (radial o axial) [8] . Para fines de este trabajo, la dirección del flujo es la que adquiere mayor importancia, por lo que las turbinas de acuerdo a la dirección del flujo motriz se clasifican en turbinas de flujo axial y turbinas de flujo radial, las cuales operan bajo casi cualquier tipo de fluido.

Las turbinas de flujo axial son aquellas en las que el fluido al pasar por los álabes se mueve en planos cilíndricos con el eje de rotación, es decir, el fluido sigue la dirección del eje de la turbina. Por otro lado, las turbinas de flujo radial son aquellas donde el fluido al pasar por los álabes, lo hace en planos normales al eje de rotación de la máquina, es decir el fluido entra desde la periferia hacia el centro de la turbina.

1.2.1. Microturbinas para Ciclos Binarios

En la actualidad existe un grupo de turbinas llamadas microturbinas y son una tecnología relativamente nueva, de generación eléctrica a pequeña escala. Estas turbinas están diseñadas para aplicaciones de generación en ciclos binarios. Algunos autores incluyen a todas las turbinas que generan una potencia eléctrica inferior a 1 MW mientras que otros en potencias de 25-300 kW. Esto abre un gran campo que incluye desde las más pequeñas que pueden ser del orden de centímetros hasta milímetros de diámetro y que generan de 10 a 100 W [8,9].

Dentro de las microturbinas para generación eléctrica en ciclos binarios, nos centraremos en describir las turbinas de tipo radial más importantes, las cuales son de tipo inflow (entrada) y de tipo outflow (salida).

En las turbinas radiales de tipo inflow, el fluido entra a través de una voluta, la cual acelera el flujo hasta llegar a un pasaje anular llamado estator para dirigir el fluido en forma correcta al impulsor del rotor, en dónde se realiza el trabajo mecánico, tal como se muestra en la Figura 1.4.

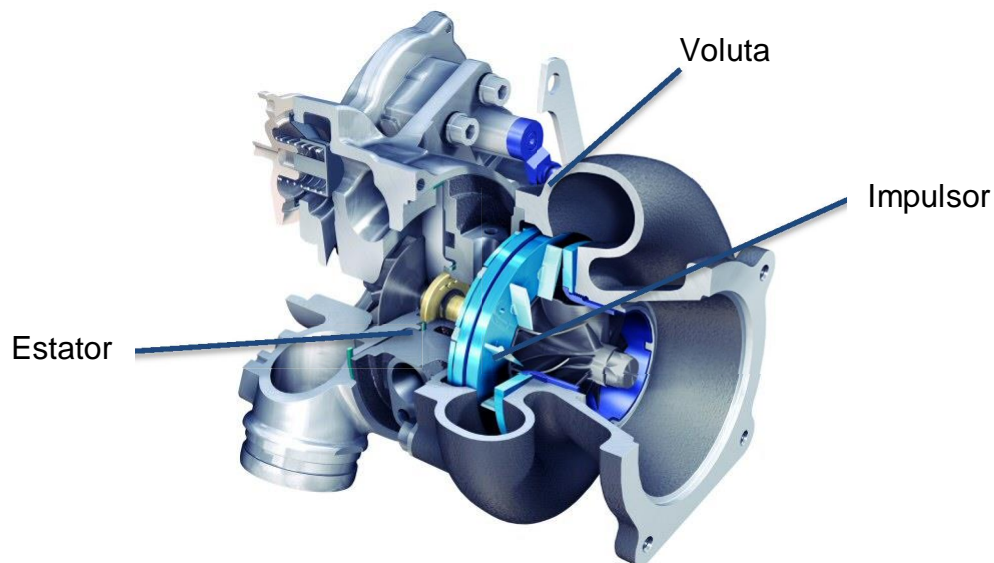


Figura 1.4 Turbina radial inflow [10].

Las turbinas radiales outflow, son aquellas donde el fluido entra en el disco de la turbina axialmente en su centro y se expande radialmente a través de una serie de etapas montadas en un disco. En la descarga del último rotor, el flujo pasa a

través de un difusor radial y luego se transporta a través de la voluta de descarga como se ilustra en la Figura 1.5 [11].

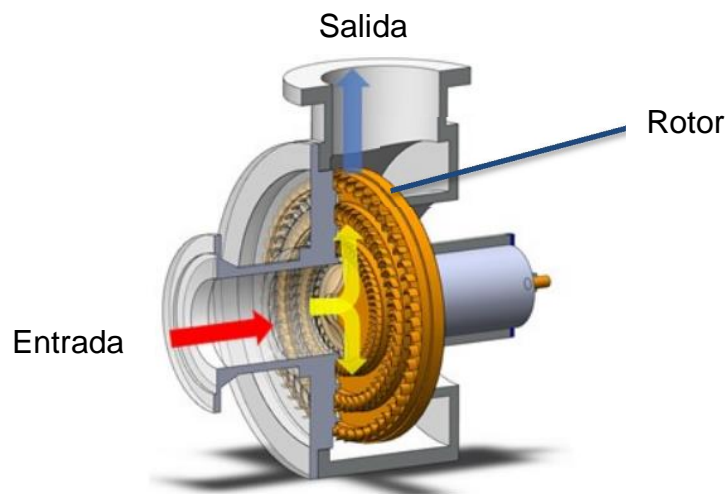


Figura 1.5 Turbina radial outflow [11].

1.2.2. Selección de la microturbina.

En trabajos relacionados a la mejora de las microturbinas se ha encontrado que las microturbinas ideales para usarse en los Ciclos Binarios son las del tipo radial. Por ello se utilizará un rotor radial inflow en este trabajo. El rotor está constituido por los álabes, que son las piezas con forma de aleta y se encuentran distribuidas en forma circular en el cuerpo de la misma. A través de ellos, se forman los conductos por donde circula el fluido haciendo girar el rotor. En la Figura 1.6 se muestra la parte móvil más importante de una microturbina llamada impulsor o rotor y es donde se transforma la energía potencial térmica del fluido en energía mecánica [12].



Figura 1.6 Rotor de microturbina [13].

Notas

Al emplear ciclos binarios para el aprovechamiento de energía geotérmica de media y baja entalpía, es necesario tener en cuenta el desarrollo de las microturbinas, que son uno de los componentes esenciales de estos ciclos. Para ello, se fabricará una turbina radial inflow que tiene como ventajas:

- Rentabilidad. Requiere mantenimiento mínimo ya que el rotor es la única parte móvil, una baja inversión inicial debido a la fabricación en serie.
- Sostenibilidad. Ya que se aprovecha la energía geotérmica que ayuda a elevar la temperatura del fluido de trabajo.
- Ambientalmente amigable ya que por su tamaño el ruido generado es mínimo.

Capítulo 2 Proceso de manufactura para rotores.

Para poder fabricar rotores de microturbina se cuentan en la actualidad con procesos como el maquinado que emplean aluminio en barras o tochos las cuales a través de un proceso de maquinado en máquinas o herramientas de 5 ejes; la fabricación digital cuya materia prima es el polvo, el cual es sometido a sinterizado mediante el uso de láser, otros que pueden ser llevados al punto de fusión o incluso se pueden combinar las técnicas para obtener las piezas finales; la impresión digital 3D, en la cual se puede utilizar metal o diferentes polímeros como materia prima y el proceso que es de nuestro interés, la fundición.

En este capítulo se resumen estos procesos mostrando las diferentes variables que en ellos intervienen.

2.1. Maquinado por Control Numérico Computarizado (CNC).

Entre los procesos que se disponen en la actualidad para poder fabricar rotores se encuentra el maquinado empleando centros de manufactura avanzada.

Como se mencionó anteriormente un centro de mecanizado es una máquina herramienta de conformado de piezas por arranque de material que utiliza para ello herramientas de corte mediante operaciones de rotación y translación. Entre los procesos que más explota se encuentran en torneado, fresado, perforado, taladrado, cepillado, rectificado. En éstos, es importante identificar si la pieza a mover es la herramienta o la pieza a fabricar y esto depende directamente del proceso que se requiera utilizar [14].

Una de las principales características de los centros de maquinado es que se trata de una máquina fija además de:

- Contar con un control numérico (CNC),
- Tiene un cambiador automático de herramientas.

Para la fabricación de rotores se parte de una preforma de revolución. En esta preforma se realizan las operaciones de desbaste, semi-acabado y acabado hasta obtener la pieza con dimensiones finales [15]. En la Figura 2.1 se ejemplifica un centro de manufactura avanzada



Figura 2.1 Centro de manufactura avanzada [16].

2.2. Fabricación Digital.

Hay otras técnicas de fabricación directa, capa por capa que parten de modelos sólidos en 3D producidos a través de Computer-Aided Design (Diseño Asistido por computadora) o CAD por sus siglas en inglés. Todos ellos son llamados fabricación sólida aditiva o fabricación digital. Estas técnicas se resumen en la Figura 2.2 y se hace una breve descripción de cada uno de ellos.

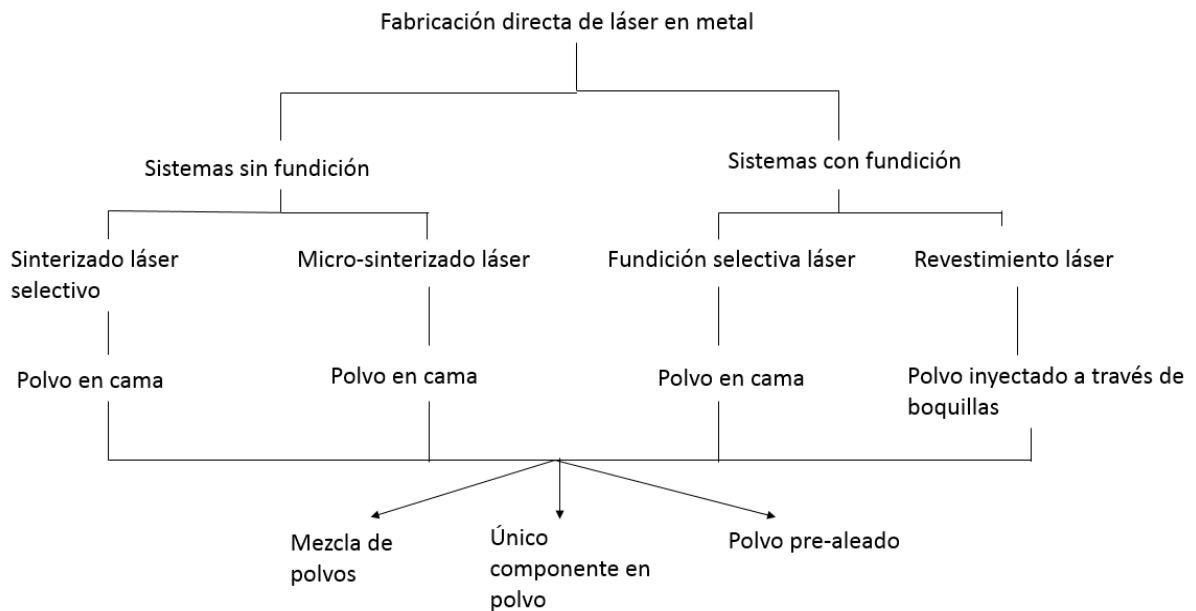


Figura 2.2 Técnicas de fabricación directa [17].

2.2.1. Sinterizado láser selectivo.

Es una técnica de manufactura aditiva cuya base es polvo de un metal. Éste permite la producción de piezas tridimensionales funcionales directamente de un modelo en 3D. Durante el proceso, capas sucesivas de partículas de polvo de metal son fundidas y se consolidan sobre la parte superior de la capa anterior por la energía de un láser de alta intensidad. Por consiguiente, no hay necesidad de ningún tipo de post-procesamiento, excepto el acabado de la superficie. Una de las principales ventajas de este proceso es la baja densidad y precisión en las dimensiones que obtienen las piezas terminadas [18]. Las dos principales razones para procesar por sinterizado láser selectivo son la facilidad de procesar usando una fase líquida sinterizada mecánicamente y, combinar varios materiales que guarden sus propiedades como si se tratara de un solo material [16]. En la Figura 2.3 se observa como se obtiene un rotor mediante sinterizado láser selectivo.

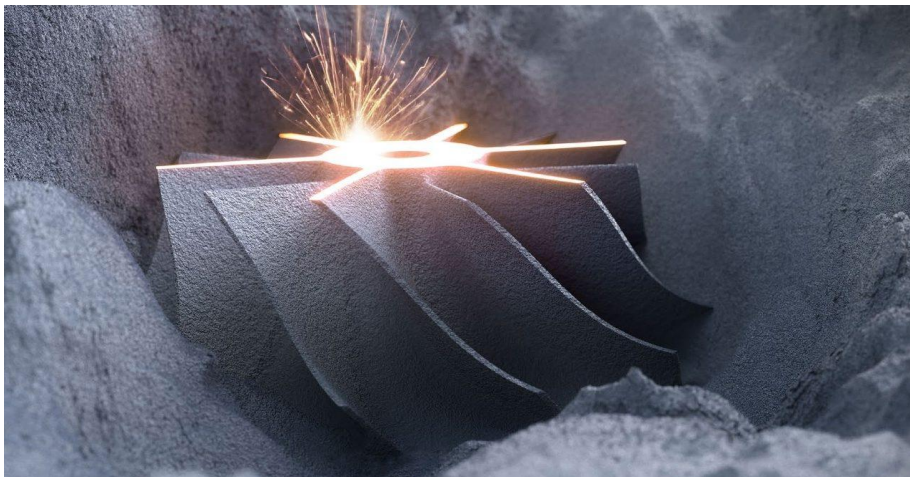


Figura 2.3 Rotor obtenido con sinterizado láser selectivo [19].

2.2.2. Micro-sinterizado láser.

Esta técnica fue desarrollada para micropartes con una resolución por arriba de $30\mu\text{m}$ y son producidas a partir de materiales en polvo. La técnica en general se basa en el método de sinterizado láser selectivo solo que se obtienen estructuras a tamaño micrométrico, se observa en la Figura 2.4 el tamaño de las piezas que se tienen por este proceso [20].

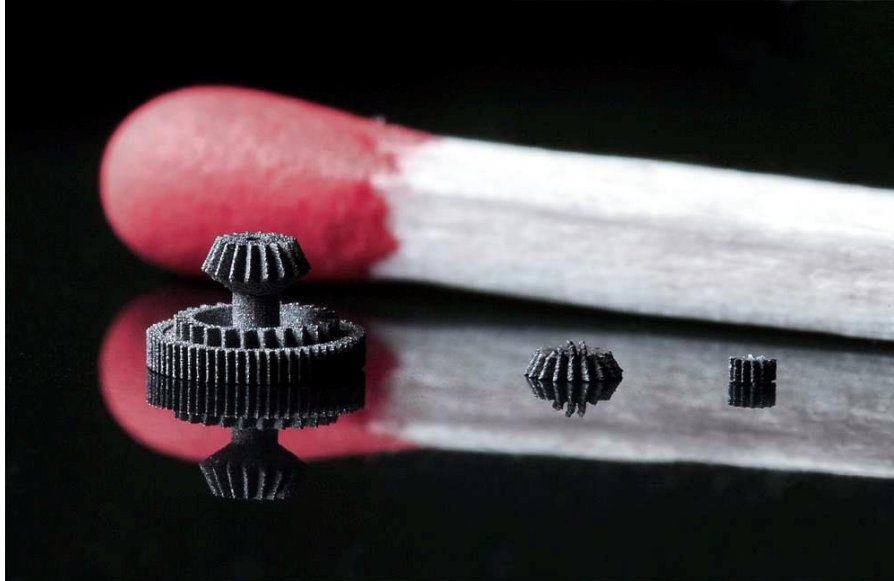


Figura 2.4 Rotor obtenido por micro-sinterizado láser [21].

2.2.3. Fundición selectiva láser.

Esta tecnología permite fabricar componentes metálicos capa a capa y obtener geometrías complejas sin la necesidad de emplear herramientas complicadas. El proceso consiste en primer lugar, en desglosar el modelo 3D en capas y transferirlo a la máquina de fusión láser selectiva. Posteriormente, el material en polvo se deposita como una capa delgada definida sobre un sustrato. La información geométrica de las capas individuales es transmitida por el rayo láser a la cama del polvo como se muestra en la Figura 2.5, en donde las regiones para contener el material sólido se exploran bajo una atmósfera inerte, dejando una capa sólida de la pieza que se producirá. Después de que el sustrato tenga un grosor de capa, los pasos del proceso se repiten hasta que la pieza se haya terminado [22].

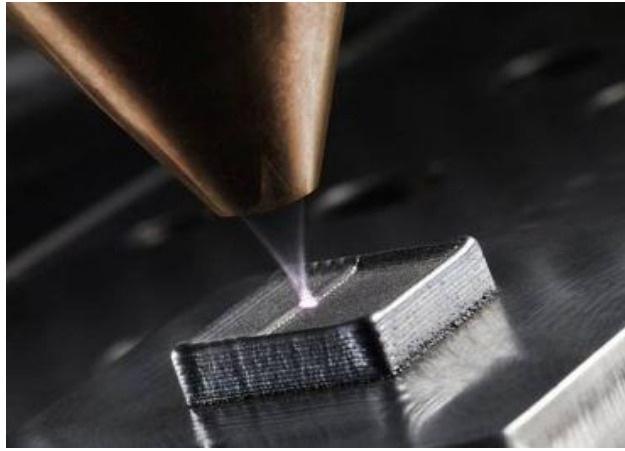


Figura 2.5 Fundición selectiva láser [23].

2.2.4. Revestimiento láser.

También llamado generación con láser. En lugar de fundir el material en un lecho de polvo, el polvo se suministra en un chorro de gas a través de boquillas. El polvo se añade coaxialmente con el rayo láser (perpendicular al sustrato). El polvo de metal se funde en la zona focal de un rayo láser de alta energía y pueden formarse partes con geometrías complejas como en la Figura 2.6. El proceso se produce en cámaras cerradas con atmósferas inertes controladas. Por lo general se alcanzan partes densas con propiedades mecánicas próximas (o incluso superiores) al material procesado convencionalmente [24].

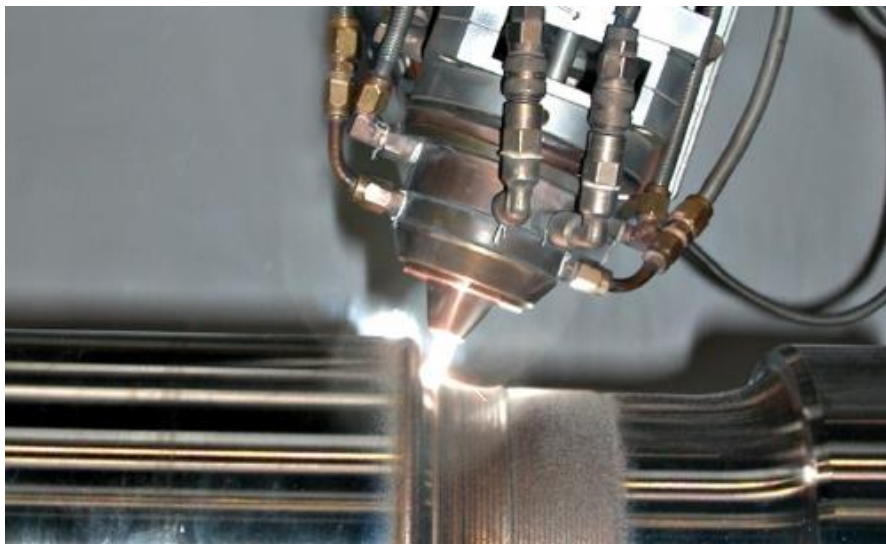


Figura 2.6 Revestimiento láser [25].

2.2.5. Deposición de metal por láser.

Actualmente se ha trabajado en una nueva técnica que combina revestimiento láser con deposición de metal y se llama deposición de metal por láser. Es la tecnología de manufactura aditiva para los componentes constructivos de un modelo automatizado del diseño 3D sin el uso de moldes o de maquinado. El principio de esta tecnología se basa en el sinterizado láser selectivo y el revestimiento láser. Un programa de control de movimiento, desarrollado a partir del modelo 3D de un componente metálico deseado, es utilizado para controlar el movimiento de un punto focal láser para trazar todas las áreas del componente en un sustrato, típicamente una capa plana a la vez. Las partículas del polvo del metal, inyectadas en la zona focal del láser, se derriten y después se re-solidifican en la pieza de metal completamente densa previamente depositada en la capa fundida que se mueve creada por el rayo láser. Simultáneamente, el sustrato se mueve en el plano x. y debajo del rayo láser para depositar una sección delgada, creando así la geometría deseada para cada capa. Después de la deposición de cada capa, el inyector de la entrada del polvo se incrementa en la dirección z positiva. Consecuentemente, las capas sucesivas se apilan para producir el componente entero del metal fundido que representa el modelo deseado del CAD, de tal modo que se construye un componente tridimensional aditivamente [26]. Ejemplo de este proceso se ilustra en la Figura 2.7.

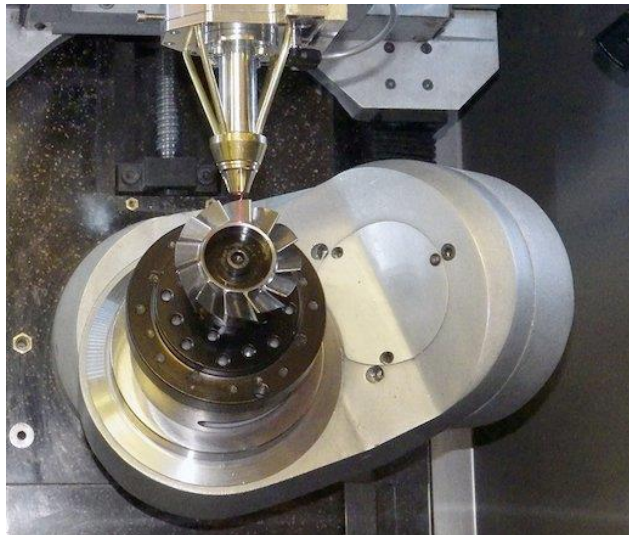


Figura 2.7 Deposición de metal por láser [27].

2.2.6. Impresión tridimensional.

En este proceso un polvo es inyectado dentro de un depósito de capas de polvo hasta obtener la forma deseada. La impresión digital da la oportunidad de controlar la composición del material del producto por inyección de diferentes materiales a través de diferentes boquillas. El material inyectado puede ser usado ya sea en forma fundida o en forma líquida, esto con la finalidad de ayudar a manipular varias propiedades tales como conductividad eléctrica, conductividad térmica, propiedades magnéticas y dureza en distintas zonas de la pieza [16]. Actualmente este tipo de impresoras pueden trabajar con el uso de polímeros como se muestra en la Figura 2.8.



Figura 2.8 Impresión digital 3D.

Aunque a través de todos estos procesos es posible obtener los rotores de las microturbinas con todas las características que éstos exigen tales como la exactitud dimensional, baja densidad y altas propiedades mecánicas es necesario mencionar que no es factible fabricarlos, por el costo elevado de los equipos así como de manufactura, por lo que se opta por utilizar métodos tradicionales como la fundición.

2.3. Fundición.

Existen diversos parámetros para la clasificación de los procesos de fundición, uno de ellos es por el tipo de moldeo empleado. Esta clasificación se ilustra en la Figura 2.9.

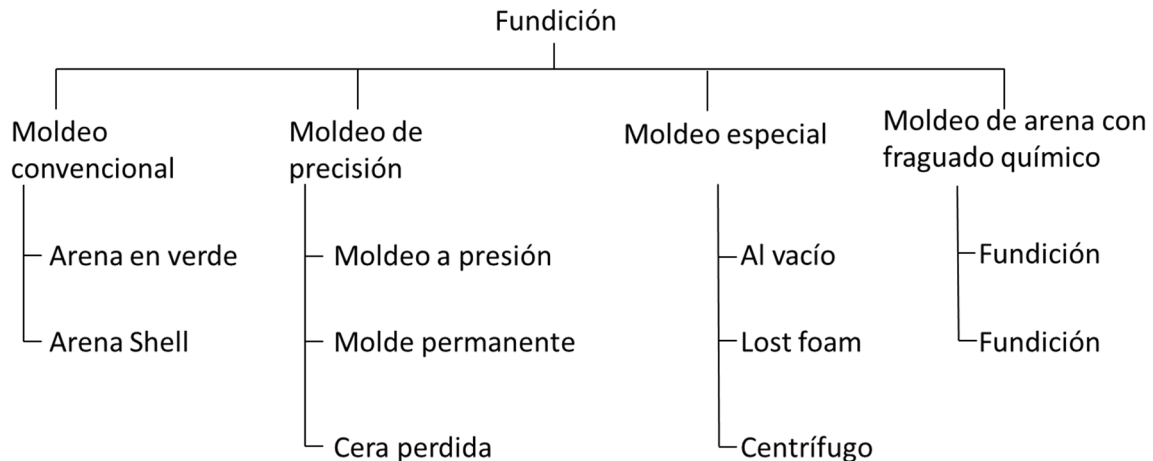


Figura 2.9 Clasificación de fundición por moldeo [28].

Al trabajar con un rotor que requiere alta precisión dimensional y buen acabado superficial, el trabajo se enfoca en el moldeo de precisión. Se hace mención de la técnica de moldeo en verde por ser la que más se emplea en fundición.

2.3.1. Moldeo arena en verde.

El moldeo en arena en verde es la fundición que usa arena húmeda o moldes en arena en verde. La necesidad de tener humedad en la mezcla (bentonita y arena) es que ayuda a que la arena se pegue cuando se realizan los moldes.

La mezcla de arena es apisonada alrededor del patrón y cuando se retira el patrón, quedará plasmada una cavidad en el molde, a veces se utilizan máquinas automatizadas. En el molde, el metal fundido se vierte y cuando se solidifica, el molde se retira de la arena. La arena puede ser nuevamente procesada y reutilizada en las siguientes fundiciones [29].

La arena verde para los moldes de fundición por lo general tiene una mezcla de:

Arena = 75-85%

Arcilla Bentonita = 5-11%

Agua = 2-4%

Otros materiales = 3-5% [30].

Dentro de las desventajas que tiene el moldeo en arena en verde se tienen:

- Poca exactitud dimensional en las piezas coladas.
- Superficies muy rugosas.
- No es recomendado para piezas con geometrías complejas.

2.3.2. Moldeo a presión.

Es mejor conocido por su nombre en inglés como *Die casting*; en este proceso el metal es forzado a entrar en la cavidad del molde a alta presión. Estos moldes pueden ser reutilizados en repetidas ocasiones para producir piezas de distintas dimensiones, formas y grosores de pared.

En este proceso, como se hizo mención, el metal entra a la matriz bajo alta presión y alta velocidad, y la presión se mantiene hasta que la pieza solidifica. Estas matrices son generalmente de acero

Las desventajas que presenta este tipo de moldeo son:

- Rentable únicamente para gran producción de piezas,
- Los defectos por aire atrapado, gas y contracciones, así como porosidad pueden prevalecer, por ello se pueden ver reducidas sus propiedades mecánicas.

2.3.3. Molde permanente.

El proceso de moldeo permanente es en el cual se utiliza un molde de metal como hierro o acero, el cual se pueden hacer varias coladas sin necesidad de volver a fabricar el molde.

En este proceso, los moldes para colada son fabricados en metal pero los patrones pueden ser de arena o metal. Una característica de este tipo de moldes es que se expanden o calientan cuando el metal fundido es vertido [29].

Durante la colada, el molde debe ser primero precalentado y el metal fundido una vez vertido en la cavidad solidificará. Una vez lista la pieza de metal se retira del molde y éste puede ser utilizado nuevamente. En algunas coladas, el tiempo de solidificación de las piezas es de semanas debido a las grandes dimensiones que por este proceso se pueden obtener.

Algunas desventajas del moldeo permanente son:

- No todas las aleaciones son adecuadas para el moldeo permanente. Algunas aleaciones que pueden emplearse para molde permanente incluyen aluminio, magnesio, zinc y aleaciones de cobre.
- Debido al alto costo de las herramientas, el proceso puede ser muy caro para baja producción de piezas.
- Algunas formas no pueden ser obtenidas usando molde permanente debido a la localización de la línea de partición o por la dificultad de remover la pieza del molde.
- Se requieren recubrimientos para proteger el molde del ataque por el metal fundido.

De estos procesos de fundición se descarta el moldeo en arena a pesar de ser el más económico, ya que la geometría que presentan los rotores impide que sea posible obtenerlo en una sola pieza y además, no se obtiene el mejor acabado superficial. El moldeo a presión así como el de molde permanente, limitan el proceso a tener una matriz o molde de metal, el cual parte de un proceso de

maquinado y debido al elevado costo de estas piezas, en este trabajo, quedan descartadas, ya que no se cuenta con el presupuesto para ello.

Por lo anterior, se utiliza el proceso de cera perdida, el cual permitirá realizar los rotores mediante el uso de un silicón que resulte flexible para el desmolde y económico para poder obtener las piezas en cera y así proceder a la fundición de los prototipos.

Capítulo 3 Principales variables en el proceso de cera perdida.

En la técnica de cera perdida, un patrón con la forma deseada, usualmente hecha de cera, es formado inyectando cera fundida en una matriz metálica. Después, el patrón o una serie de patrones se conectan a un alimentador central de cera llamado árbol. El árbol es recubierto con un cerámico o con una mezcla refractaria, la cual al fraguar genera una cáscara alrededor del patrón de cera. El patrón de cera es removido desde la cáscara mediante evaporación, dejando un hueco dentro de la cáscara, que coincide exactamente con la forma del ensamble. Antes de la fundición, la cáscara es calentada en un horno donde el calor intenso elimina cualquier remanente de cera. En la cáscara refractaria resultante, endurecida por el calentamiento, se vacía el metal fundido. Después de que el metal fundido solidifica, la cáscara se retira y los cuellos son cortados de la pieza colada para obtener el componente en su totalidad [31]. El proceso se ilustra en la Figura 3.1.

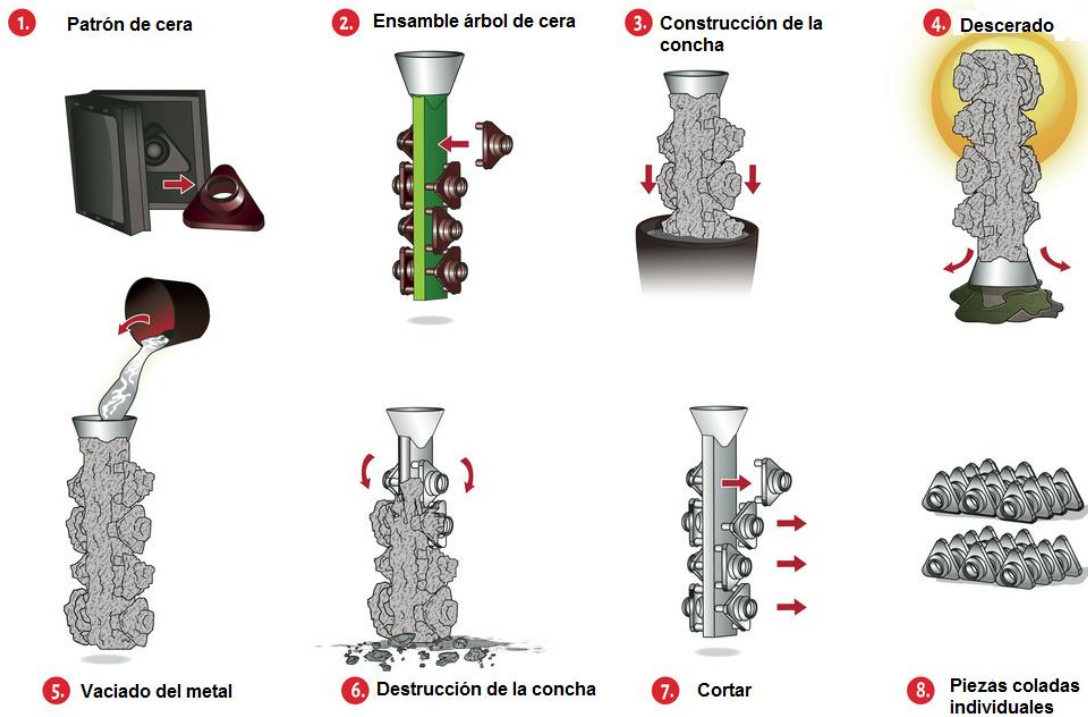


Figura 3.1 Proceso cera perdida [32].

3.1. Preparación del patrón.

El patrón en cera perdida es de una geometría exacta para la fundición final requerida, pero con tolerancias dimensionales para compensar su contracción volumétrica así como la contracción por solidificación de la aleación fundida en el molde cerámico. Uno de los materiales más comunes para el patrón es la cera y su uso depende del volumen de producción [33]. La cera seleccionada debe tener las siguientes características:

- Tener la más baja expansión térmica para que pueda tener una forma con gran exactitud dimensional.
- Ser resistente a la fractura.
- Tener una superficie lisa y fácil de humectar con sustancias afines a la cera para que la pieza colada final obtenga una superficie lisa.
- Tener una baja viscosidad para llenar la sección más delgada de la matriz.
- Deberá retirarse de la matriz fácilmente.
- Tener muy bajos contenidos de ceniza para que no deje alguna dentro de la cáscara cerámica.
- Ser ambientalmente seguro.

Otros factores importantes para selección de la cera son costos, disponibilidad, facilidad de reciclaje, toxicidad, etc. [28].

3.2. Ensamblaje del árbol de cera.

Se conoce como árbol al conjunto de patrón, sistema de alimentación y copa de vaciado, su ensamble se consigue uniendo los patrones a un tronco mediante el calentamiento de la cera con ayuda de una espátula o con una pequeña flama. El número de modelos, el tipo de sistema de alimentación y su ubicación con respecto a la copa de vaciado dependen del tipo de aleación, del tamaño y de la configuración de la fundición. Después de este paso es necesario limpiar el árbol de cera de posibles grasas, suciedad, lubricantes remanentes o de pedazos de cera sueltos. La limpieza se realiza enjuagando el árbol de cera en una solución acuosa o en solventes que no ataquen la cera. Después de la limpieza se deben

dejar reposar hasta alcanzar la temperatura ambiente para evitar posibles contracciones por el enfriamiento [33].

3.3. Construcción de la cáscara cerámica.

La cáscara cerámica en el proceso de cera perdida debe tener como requerimientos:

- Suficiente resistencia en verde (para poder remover la cera sin tener una fractura).
- Alta resistencia de calentamiento (para soportar el peso del metal fundido).
- Alta resistencia al choque térmico (para prevenir rompimiento durante la colada del metal).
- Alta estabilidad química (para prevenir interacción molde-metal).
- Suficiente permeabilidad del molde (para permitir que el aire atrapado logre permear a través de las paredes del molde durante la colada del metal).
- Facilidad para ser retirado de la fundición.

El árbol de cera es sumergido repetidamente dentro de la mezcla cerámica mientras que éste va girando sobre su eje, para drenar el exceso de cerámico con el fin de ir produciendo capas uniformes. A continuación se aplica arena fina, introduciendo el árbol cubierto al lecho de estas partículas. Para las primeras capas se emplean partículas de tamaño muy fino para garantizar una superficie muy lisa, conforme incrementan las capas, el tamaño de partícula también aumenta. El número de capas depende directamente del tamaño de las piezas a fundir.

Uno de los factores a controlar en esta etapa es el secado. Si el secado es demasiado rápido, el efecto de enfriamiento hace que el patrón se contraiga mientras que el recubrimiento está húmedo y sin adherir. Luego, a medida que el recubrimiento desarrolla resistencia e incluso se reduce un poco, la cera comienza

a expandirse a medida que disminuye la velocidad de secado y recupera la temperatura [28].

3.4. Proceso de descerado.

El proceso de descerado ha sido llevado a cabo convencionalmente usando autoclave de descerado, donde se colocan los moldes cerámicos que contienen los patrones de cera. Los moldes cerámicos son calentados bajo condiciones de humedad/calor (a alta temperatura y presión) permitiendo que al calentar uniformemente la cáscara y así la extracción de la cera, la cual puede ser reutilizada [28].

Una vez que se extrae la cera, los moldes deben de calentarse entre los 900 y 1100°C [33] para quemar restos de cera remanentes y además, aglutinar la masa cerámica para obtener mayor resistencia y desarrollar permeabilidad. El proceso no debe exceder una hora.

3.5. Colado y acabado.

Los moldes una vez cocidos se dejan enfriar en horno hasta alcanzar una temperatura que oscile de 600 a 900°C [33] para posteriormente ser llevados a la colada. Esta temperatura depende de las dimensiones de la pieza y de la aleación. El colado se realiza a estas temperaturas debido a que alrededor de los 580°C [33] el cuarzo sufre una transformación de fase que provoca una variación brusca de volumen que puede causar grietas en el molde.

Para facilitar el vaciado se utilizan diferentes métodos para llenar con el metal fundido las cáscaras usando gravedad, presión, vacío y métodos centrífugos.

Cuando el metal fundido en la cáscara ha solidificado y enfriado lo suficiente, la colada puede ser retirada. Aunado al proceso de vaciado se puede llevar a cabo el tratamiento del metal líquido mediante desgasificado y refinación.

La fusión del aluminio disuelve hidrógeno e impurezas sólidas (óxidos, nitruros, etc.). La cantidad de gas en solución aumenta con el incremento de la temperatura

del metal. El gas y las impurezas sólidas retenidas en la solidificación son una fuente de defectos en el producto terminado y deberán eliminarse antes del vaciado. Son variados los procesos disponibles para la reducción del contenido de hidrógeno del aluminio fundido y sus aleaciones. En la última década se han desarrollado diversos métodos que permiten la obtención de aleaciones de alta calidad, tratando el metal fundido para la desgasificación mediante el burbujeo de un gas inerte como el argón, una mezcla de gas inerte y cloro o simplemente cloro. Dentro de éstos se encuentra el uso de sistemas agitados mecánicamente; en los cuales el gas de desgasificado se inyecta empleando principalmente: tapones porosos, lanzas, boquillas; entre otros. Uno de los métodos con mayor aceptación en la industria de desgasificación es el método de rotor-inyector, que ha sido probado como el medio más eficaz para obtener los resultados deseados en los procesos de aluminio. En estos sistemas, el gas se inyecta a través del eje del impulsor y la velocidad del rotor promueve el contacto gas-líquido; obteniendo con ello una buena dispersión de las burbujas y mejorando el tiempo de residencia del gas, por lo tanto mejorando el mezclado y acelerando la cinética de desgasificación [34]. Otra manera es introducir hexacloroetano (C_2Cl_6) dentro del fundido, el cual se descompone para liberar cloro en su estado activo y así eliminar al hidrógeno. Mientras más fina sea la dispersión de las burbujas de gas y mayor sea su distancia de recorrido a través del metal mayor es la eficiencia de la desgasificación. Además de la reducción del contenido de hidrógeno, las burbujas de gas también eliminan parte de las sustancias no metálicas suspendidas. Los elementos para refinar el grano, como el Ti, Ti-B, Zr, etc., se añaden a la fundición en forma de aleaciones maestras. Estas adiciones se introducen al proceso en una etapa tardía para que se reduzcan las posibilidades de que se coagulen los constituyentes nucleantes y que se sedimenten en la parte inferior del horno [35].

Al tener la pieza solidificada, se retira la cáscara de cerámico que contiene a la pieza colada, por lo que se llega a utilizar vibración, chorro de agua o herramientas como cincel y martillo.

3.6. Selección material para fundición del rotor.

La elección de los materiales para los elementos de una turbina debe basarse en un número de factores tanto de diseño como de operaciones particulares que incluyen velocidad de operación, el tamaño del rotor y la temperatura del vapor de ingreso. Entre las principales propiedades a evaluar en los materiales para un rotor se encuentran: una alta resistencia mecánica y a la fatiga, una alta rigidez, baja densidad, alta conductividad térmica y bajo coeficiente de expansión térmico, así mismo, contar con una alta tenacidad a la fractura y buenas propiedades superficiales como una alta resistencia a la corrosión y erosión por partículas en el vapor, manteniendo siempre una buena relación entre costos [36]. Siendo uno de los factores más importantes la temperatura a la cual opera se utilizan las aleaciones enlistadas en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1 Aleaciones empleadas dependiendo de la temperatura de trabajo [37].

Hasta	Aleación empleada
120°C	Aleaciones de aluminio
500°C	Aceros austeníticos, aleaciones de Ti
1000°C	Superalloys de Ni y Co como metales básicos
1700°C	Metales refractarios (W, Mo, Nb, Ta) o bien, grafito y materiales cerámicos

Como se mencionó en el Capítulo 1, el fluido de trabajo no supera los 150°C por lo que el material adecuado es el aluminio. Para este trabajo se utilizó la aleación 6061, la cual tiene la composición química contenida en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2 Composición química Al 6061 [38].

% Si	% Fe	% Cu	% Mn	% Mg	% Cr	% Zn	% Ti	Otros
0.4-0.8	0.7 máx.	0.15-0.40	0.15 máx.	0.8-1.2	0.04-0.35	0.25 máx.	0.15 máx.	0.15

En la Tabla 3.3 se muestran sus propiedades mecánicas así como las de la aleación sin tratamiento y con tratamiento.

Tabla 3.3 Propiedades mecánicas Al 6061 [38].

Aleación	Resistencia a la tensión (MPa)	Límite elástico (MPa)	Dureza (HB)*	Resistencia a la fatiga (MPa)
6061-O	124	55	30	62
6061-T4	241	145	65	76
6061-T6	310	276	95	97

* Usando carga de 500kg durante 30s y penetrador de 10mm

Capítulo 4 Proceso de fundición a la cera perdida.

En este capítulo se pretende desarrollar el trabajo de fundición a la cera perdida, partiendo de la obtención de un prototipo de microturbina en 3D.

Este prototipo servirá de referencia para generar el molde de silicón en el cual quedará una cavidad que será llenada con cera hasta obtener varias piezas que servirá para hacer el sistema de colada. Además, se realiza el cálculo del sistema de colada para que las microturbinas fundidas no tengan defectos.

Una parte importante de este trabajo, es que se desarrollaron dos microturbinas con dimensiones diferentes, esto con la finalidad de resolver algunos problemas al momento de realizar el modelo de cera.

4.1. Generación de los prototipos 3D.

Para poder obtener un patrón en cera de la turbina se parte de un modelo CAD mostrado en la Figura 4.1 correspondiente al rotor de 13 álabes y en la Figura 4.2, el de 5 álabes junto con las dimensiones de estos prototipos, el archivo es procesado por la impresora de manufactura aditiva para obtener la pieza en 3D Figuras 4.3 y 4.4. El tiempo de obtención de cada pieza no solo depende del tamaño, si no de la calidad de cada capa, si se requiere una estructura de soporte así como de posible tratamiento posterior para retirarlo.

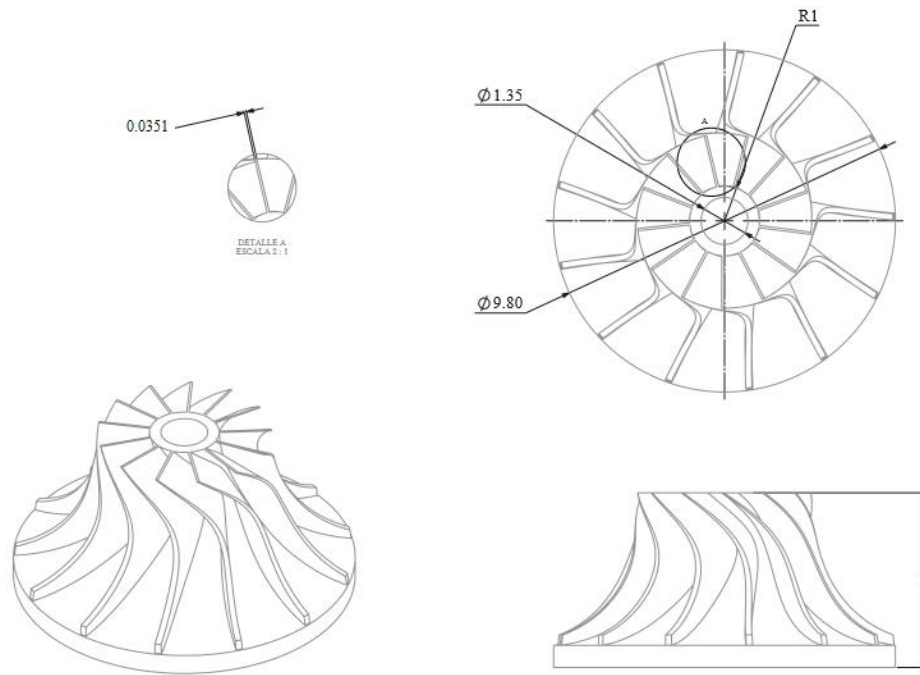


Figura 4.1 CAD con dimensiones (cm) del rotor 13 álabes.

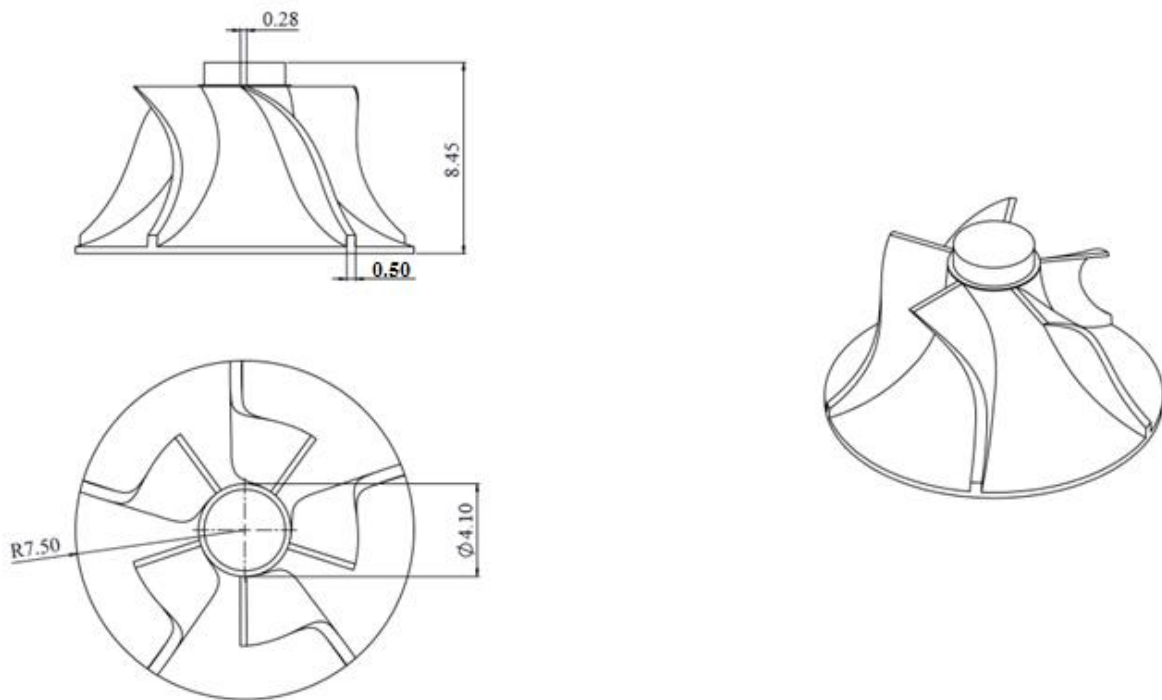


Figura 4.2 CAD dimensiones (cm) rotor 5 álabes.



Figura 4.3 Impresión 3D rotor 13 álabes.



Figura 4.4 Impresión 3D rotor 5 álabes

La impresora utilizada fue de manufactura aditiva, empleó hilos de ABS cuyo diámetro fue de 0.178mm para tener un mejor acabado superficial y evitar rugosidad. La selección de esta impresora fue por que el modelo 3D tiene una contracción de 0.007cm logrando que en el modelo no haya diferencias dimensionales. Se sugirió que la pieza no quedara hueca, ya que la sección más delgada correspondiente a la parte superior de los álabes no fuera lo suficientemente rígida para poder hacer la matriz en silicón.

El prototipo impreso cuenta con las mismas medidas que el CAD. Como se observa, la dimensión de álabes superior del rotor de 13 álabes es de 0.03cm haciendo que sea una superficie muy flexible, por lo que se debe tener cuidado al manejarlo para evitar que se fracture; en el caso del rotor de 5 álabes, al sección es más gruesa, 0.28 cm generando una superficie con mayor rigidez.

4.2. Generación de la matriz en silicón.

Una vez obtenidos los prototipos se requería tener un contra-molde o matriz en la cual se vaciará la cera para adquirir la forma de los rotores.

En esta etapa se utilizó caucho de silicón PE-21, el cual después de fraguar cumplía con la característica de ser flexible para poder ser retirado el prototipo y una vez que la cera fuera vertida, tener la suficiente resistencia para contenerla y

poder desmoldear fácilmente sin que la pieza se dañara. Es necesario mencionar que se requería lubricar el prototipo 3D para que no se adhiriera al silicón. En la Figura 4.5, se observa el molde abierto con una línea de partición, aplicado en ambos modelos y en la Figura 4.6 el modelo uniendo ambas secciones con el uso de cinturones de plástico.



Figura 4.5 Molde Silicón con una sola división.



Figura 4.6 Molde de silicón.

En la parte inferior se hicieron dos orificios: uno para llenar con cera y que por gravedad llenar la sección delgada y el otro para que se fuera liberando el aire contenido.

4.3. Patrón en cera.

Después de vaciar la cera a una temperatura de 90°C, se dejó solidificar dentro de cada uno de los moldes hasta obtener la Figura 4.7. Al presentar defectos por un llenado deficiente en la zona de los álabes, se colocaron pequeños trozos de cera, los cuales fueron fundidos hasta tener la forma requerida, como en la Figura 4.8.



Figura 4.7 Patrón en cera de 13 álabes con defectos.



Figura 4.8 Patrón de cera de 13 álabes con retoques.

Los patrones en cera fueron retocados con cucharilla caliente para eliminar zonas irregulares de la superficie hasta tener modelos en cera como la Figura 4.9 y en caso de la Figura 4.10, no se requirió hacer más que eliminación de la línea de partición. Para el rotor de 5 álabes, se contó con la participación de la Escuela Nacional de Pintura, Escultura y Grabado "La Esmeralda" del CENART quienes ayudaron a generar el modelo de cera disminuyendo el número de defectos.



Figura 4.9 Patrón de cera final del rotor de 13 álabes.



Figura 4.10 Patrón en cera de rotor 5 álabes.

Se obtuvieron tres rotores de 13 álabes los cuales fueron ensamblados en el árbol que será recubierto con cerámico. En el caso del rotor de 5 ejes solo se obtuvo un rotor de cera.

4.4. Diseño sistema de colada y alimentadores.

Se diseñó una colada de tipo vertical, ya que el componente tiene un peso inferior a 1kg [39] y se aprovechará la bajada como alimentador para obtener dos piezas por molde. El arreglo obtenido se observa en la Figura 4.11.

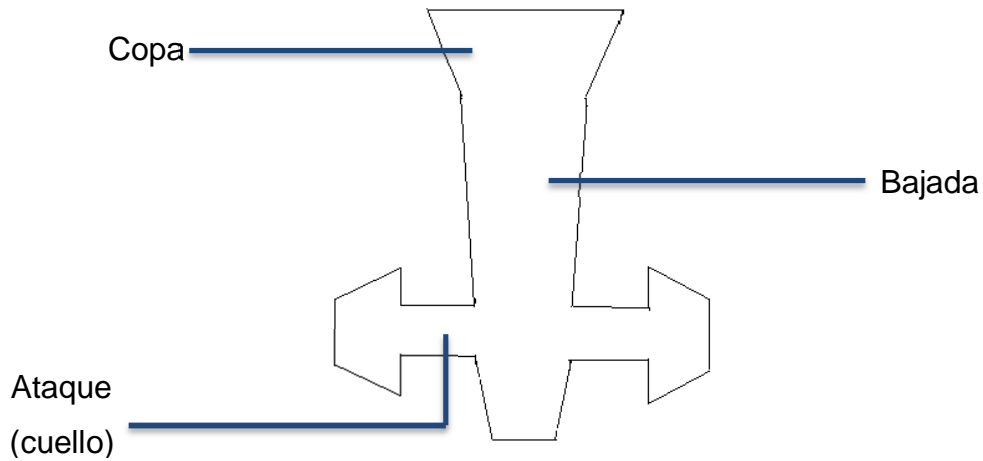


Figura 4.11 Diseño del sistema de colada.

Las características de la aleación 6061 se mencionan en la Tabla 5:

Tabla 4.1 Características aleación 6061	
Característica	Valor
Densidad ()	$2.7 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$
Temperatura de liquidus (T_l)	652°C
Temperatura de solidus (T_s)	582°C

La temperatura de colada recomendada está dada por la Ecuación 1.

$$T_c = T_{liq} + 100^\circ\text{C} \quad \text{Ec. 1}$$

El porcentaje de contracción considerado es del 8%.

La sección masiva se considera como una pirámide trunca en ambos rotores como se observa en la Figura 4.12.

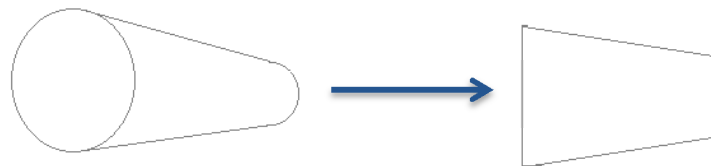


Figura 4.12 Consideración cuerpo del rotor

En la Tabla 4.2 se resumen los valores correspondientes a cada uno de los rotores para poder efectuar cálculos de módulos de solidificación

Tabla 4.2 Datos de los rotores

Datos	Rotor 13 álabes	Rotor 5 álabes
Peso de pieza (g)	317.2	1119.05
Peso total en molde (g)	634.4	2238.10
Volúmen rotor (cm ³)	117.14	414.46
Area superficial (cm ²)	404.8	648.46
Sin álabes área (cm ²)	213.16	445.41
Sin álabes perímetro (cm)	371	566.8

4.4.1. Cálculo de módulo de solidificación.

Sección álabes.

Se considera el álabes como placa delgada con espesor promedio Ecuación 2.

$$e = \frac{e_1 + e_2}{2} \quad \text{Ec. 2}$$

Rotor 13 álabes

$$e = \frac{(0.1800 + 0.0351)}{2} = 0.10755$$

Rotor 5 álabes

$$e = \frac{(0.5017 + 0.281)}{2} = 0.39135$$

Obteniendo como módulo de solidificación del álabes mediante la Ecuación 3.

$$M = \frac{e}{2} \quad \text{Ec. 3}$$

Rotor 13 álabes

$$M_c = \frac{0.107}{2} = 0.054 \text{ cm}$$

Rotor 5 álabes

$$M_c = \frac{0.391}{2} = 0.196 \text{ cm}$$

Sección cuerpo.

Se utiliza la fórmula de módulo de solidificación, en la forma de la Ecuación 4.

$$M_c = \frac{V_c}{A_c} \quad \text{Ec. 4}$$

Rotor 13 álabes

$$M_c = \frac{213.16}{371.0} = 0.575 \text{ cm}$$

Rotor 5 álabes

$$M_c = \frac{445.41}{566.8} = 0.786 \text{ cm}$$

Sección alimentador

El cálculo de Módulo de solidificación del alimentador es con la Ecuación 5.

$$M_f = 1.2M_c \quad \text{Ec. 5}$$

Donde

M_f = Módulo del alimentador (feeder)

M_c = Módulo de la pieza (cast). Se considera el módulo mayor de los segmentos.

Rotor 13 álabes

$$M_f = 1.2(0.575 \text{ cm}) = 0.69 \text{ cm}$$

Rotor 5 álabes

$$M_f = 1.2(0.786 \text{ cm}) = 0.94 \text{ cm}$$

Utilizando la Ecuación 6 se obtiene el Volumen de metal demandado para cada rotor:

$$V_{MD} = k_r V_i \quad \text{Ec. 6}$$

Donde:

K= Eficiencia del alimentador =8

r=% de contracción de la pieza solidificada

V_i= volumen del segmento a alimentar

Rotor 13 álabes

$$V_{i13} = 8 * \frac{8}{100} * 117.4 = 75.136$$

Rotor 5 álabes

$$V_{i5} = 8 * \frac{8}{100} * 414.46 = 265.25$$

Se calcula la demanda de volumen por el segmento con mayor módulo empleando la Ecuación 7 [39].

$$\frac{V_{i13}}{V_{i5}} = \frac{V}{V - V} \quad \text{Ec. 7}$$

Donde:

= eficiencia del alimentador, considerándolo 18

= contracción por solidificación con valor de 8

V_F= Volumen del alimentador (feeder).

V_C= Volumen de la pieza (cast).

Rotor 13 álabes

$$V_{i13} = \frac{8}{18 - 8} * 2 * 117.14 = 187.84$$

Rotor 5 álabes

$$V_{i5} = \frac{8}{18 - 8} * 2 * 414.46 = 663.14$$

Considerando que el alimentador tiene forma cilíndrica se tiene la Ecuación 8.

$$V_{i13} = \frac{V}{4} \quad \text{Ec. 8}$$

Dónde:

D_F = Diámetro del alimentador (feeder).

H_F = Altura del alimentador (feeder).

Considerando $H_F=2D_F$ ó $\frac{H_F}{D_F} = 2$ en la Ecuación 8 se obtiene:

$$Z_{20} = \frac{2}{2} Z_{20} \quad \text{Ec. 9}$$

Despejando de la Ecuación 9 el D_F y sustituyendo los valores correspondientes al volumen del alimentador (V_F) se tiene:

Rotor 13 álabes

$$Z_{20} = \frac{2 \cdot Z_{20}}{2} = \frac{2 * 187.54}{2} = 4.92$$

$$Z_{20} \approx 5$$

Rotor 5 álabes

$$Z_{20} = \frac{2 \cdot Z_{20}}{2} = \frac{2 * 663.14}{2} = 20.55$$

$$Z_{20} \approx 21$$

Además si:

$$Z_{20} = 2Z_{20} = 9.84$$

$$Z_{20} \approx 10$$

$$Z_{20} = 2Z_{20} = 41.10$$

$$Z_{20} \approx 42$$

De la Ecuación 9

$$Z_{20} = 187.07$$

$$Z_{20} = 13631.86$$

Se calcula en área de alimentador con la Ecuación 10.

$$Z_{20} = Z_{20} + \frac{2}{2} Z_{20} = 2Z_{20} + \frac{2}{2} Z_{20} = \frac{5}{2} Z_{20} \quad \text{Ec. 10}$$

$$Z_{20} = 190.11$$

$$Z_{20} = 3316.76$$

Se calcula cada uno de los módulos:

$$\sigma_{\theta} = \frac{\tau}{\rho} = \frac{187.07}{190.11} = 0.98 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{\theta} = \frac{13631.86}{3316.76} = 4.11 \text{ MPa}$$

Sección cuellos

Al diseñar un alimentador vertical se optó por que los rotores quedaran unidos mediante cuellos laterales, utilizando la Ecuación 11.

$$L_N = D_N + 0.1 D_N \quad \text{Ec. 11}$$

Dónde :

D_N = Diámetro del cuello (neck).

L_N = Longitud del cuello (neck).

Tomando en consideración que

Ec. 13

$$L_N = \frac{D_N}{3}$$

La Ecuación 11 resulta en la Ecuación 13:

$$L_N = \frac{13}{30} D_N$$

Rotor 13 álabes

$$r_{\text{p}} = \frac{13 * 4.92}{30} = 2.132$$

$$r_{\text{p}} \approx 2.5$$

Rotor 5 álabes

$$r_{\text{p}} = \frac{13 * 20.55}{30} = 8.905$$

$$r_{\text{p}} \approx 9$$

Despejando de la Ecuación 11

$$r_{\text{p}} = 2.132 - 0.1 * 4.92 = 1.64$$

$$r_{\text{p}} \approx 2.0$$

$$r_{\text{p}} = 8.905 - 0.1 * 20.55 = 6.85$$

$$r_{\text{p}} \approx 7.0$$

Obteniendo el módulo del cuello y considerando que D=H:

$$r_{\text{p}} = \frac{r}{r} = \frac{\frac{r}{4} * r}{r * r + \frac{r}{2} * r} = \frac{\frac{r}{4} * r}{r * r} = \frac{r}{4}$$

Dónde

M_N = módulo del cuello (neck).

$$r_{\text{p}} = \frac{2.5}{4} = 0.625$$

$$r_{\text{p}} = \frac{9}{4} = 2.25$$

En la Tabla 4.3 se encuentran los módulos de solidificación de los álabes, el cuerpo del rotor y el del alimentador.

Tabla 4.3 Módulos de solidificación.

Sección	Rotor 13 álabes	Rotos 5 álabes
Álabe	0.054	0.196
Cuerpo del rotor	0.575	0.786
Alimentador	0.98	4.11
Cuello	0.625	2.25

Al hacer el comparativo entre cada sección de cada rotor, la ruta de solidificación es la siguiente: quedando como última sección a solidificar el alimentador, el cual cumplirá las dos funciones principales que son proporcionar el metal líquido a las demás secciones siendo el último de solidificar y al efectuarse esto, en él se localizará el rechufe o contracción metal-líquido.

$$r_{\text{álabes}} < r_{\text{rotor}} < r_{\text{rotor}} < r_{\text{rotor}} < r_{\text{rotor}}$$

Con los datos obtenidos se realizó un diseño previo del sistema de colada y alimentación con ayuda del programa de diseño mostrado en la Figura 4.13, donde se incluyen las dimensiones de cada uno de los componentes. En el caso de la copa, se emplea la relación 1:1.1:1.2

Rotor 13 álabes

$$r_{\text{rotor}} \text{ (álabes)} = 5 * 1.1$$

$$= 5.5$$

$$r_{\text{rotor}} \text{ (rotor)} = 5 * 1.2$$

$$= 6$$

Rotor

$$r_{\text{rotor}} \text{ (álabes)} = 21 * 1.1$$

$$\approx 23$$

$$r_{\text{rotor}} \text{ (rotor)} = 21 * 1.2$$

$$\approx 25$$

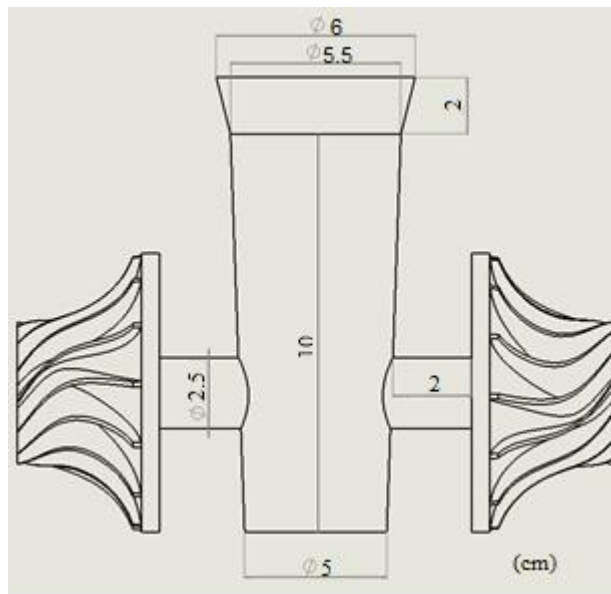


Figura 4.13 Diseño del sistema de colada.

El árbol ensamblado en el sistema de colada se muestra en la Figura 4.14. Para el sistema de 13 álabes, el sistema de colada para el rotor de 5 álabes es similar, únicamente cambiando las dimensiones de cuellos, alimentador y copa.



Figura 4.14 Árbol de cera.

4.5. Recubrimiento refractario.

En esta sección de trabajo, para el rotor de 13 álabes se contó con la ayuda de la empresa MetalCast S.A. de C.V. ya que cuentan con el equipo para poder llevar a cabo el recubrimiento, el descerado y la colada.

La primera etapa fue pegar el árbol que se diseñó a una de las bajadas que maneja la empresa así como alisar las superficies que tenían algún defecto.

Una vez realizado este paso se debió eliminar la grasa de la superficie del árbol y esto se efectuó lavando el árbol en una solución ácida compuesta de cítricos y jabón y posteriormente, se realizó un enjuague con agua para retirar el exceso de la solución. El árbol es colocado en un cuarto con temperatura y humedad controlada para que la cera se homogenice y se seque. Logrado esto, se aplica las capas de cerámico.

4.6. Descerado y sinterizado molde cerámico.

La extracción de la cera es mediante el uso de autoclave, con ello se consiguió un reciclaje de la cera. Para poder comenzar la colada, es necesario que los moldes o cáscaras cerámicas fueran homogeneizadas a una temperatura de $900 \pm 50^{\circ}\text{C}$ (esta temperatura así como el tiempo de permanencia están definidos por MetalCast). Además, se hizo el precalentamiento de la cáscara a 700°C para evitar el choque térmico al momento de efectuar el vaciado del metal fundido.

En el caso del rotor de 5 álabes, la cáscara se formó con yeso, el calentamiento de la misma así como del descerado fue llevado directamente en el laboratorio de fundición del Departamento de Metalúrgia, colocando en la tapa del horno de crisol la pieza y llevándose al mismo tiempo ambos procesos, como se muestra en la Figura 4.15.



Figura 4.15 Descerado y sinterizado de la cáscara rotor 5 álabes.

4.7. Fundición.

La fundición de la aleación se llevó a cabo en un horno de inducción. La temperatura de vaciado en la cáscara fue de 664°C . Se agregó refinador de grano y se llevó a cabo una desgasificación con pastillas de C_2Cl_6 .

4.8. Limpieza de cerámico y corte.

Una vez que el metal solidificó y enfrió a temperatura ambiente se realizó el desprendimiento del cerámico con uso de cincel y agua a presión. El árbol sin refractario se muestra en la Figura 4.16.



Figura 4.16 Árbol sin refractario.

Se observa que la empresa MetalCast hizo el acomodo de 3 rotores por árbol (por el tiempo que implicaba unir dos sistemas a su árbol) y además en la parte inferior, la unión al tronco que manejan. Las piezas individuales se cortaron con arco y en la Figura 4.17 se tiene el rotor final de 13 álabes y en la Figura 4.18 el rotor de 5 álabes

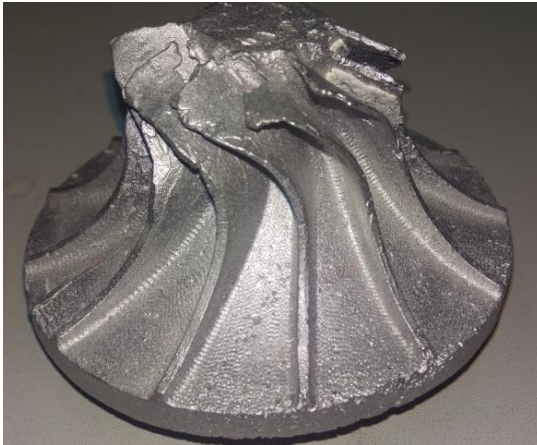


Figura 4.17 Rotor colado.



Figura 4.18 Rotor 5 álabes colado.

4.9. Caracterización del rotor

Obtenidos los rotores fundidos fue necesario hacer un análisis micro estructural, por lo que una de las piezas se cortó y preparó para metalografía. La pieza fue atacada con el reactivo de HF [40].

Otra sección fue desbastada hasta lija 240 y en ella se realizó el ensayo de dureza, por triplicado, empleando el durómetro Brinell. El valor de dureza se obtuvo mediante la Ec. 14

$$HB = \frac{P}{\frac{\pi}{2} D \sqrt{D^2 - d^2}} \quad \text{Ec. 14}$$

Tomando como valores

Diámetro de penetrador (D)= 10mm

Diámetro de la huella promedio (d)= 3.98mm

Carga aplicada (P)= 500kg

Tiempo de aplicación de carga (t)= 30s

Sustituyendo valores en la Ec. 14 se obtiene:

$$HB = \frac{500 \text{ kg}}{\frac{\pi}{2} * 10 \text{ mm} \sqrt{10^2 \text{ mm}^2 - (3.98 \text{ mm})^2}} = 38.52$$

Capítulo 5 Resultados y análisis.

5.1. Modelo 3D y matriz.

Para la obtención de los rotores a la cera perdida, fue necesario como se mencionó en capítulos anteriores tener el control de distintas variables, empezando por la fabricación del prototipo 3D. El prototipo debió tener como principal característica una superficie con la menor rugosidad posible. En la Figura 5.1 se observa la superficie del prototipo.



Figura 5.1 Superficie prototipo rotor 3D.

En este prototipo 3D se puede apreciar que la manufactura es hecha en capas y se tiene la ventaja de que al manejar hilos con espesor 0.178cm deja una superficie con muy baja rugosidad y esta pueda prácticamente ser eliminada mediante el uso de lija. Sin embargo, la sección correspondiente a los álabes de la Figura 5.2, es complicada de trabajar.

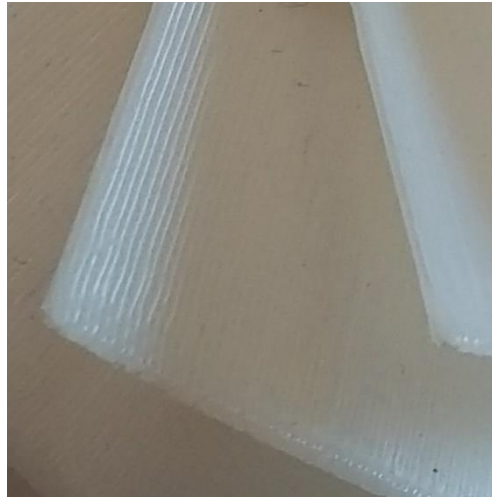


Figura 5.2 Sección álabes en prototipo 3D.

Cada uno de los álabes consta únicamente de tres capas de hilo por sección engrosándose hacia la parte inferior además de un espacio entre álabes menor a 5mm dificultando poder trabajar en esta sección. A pesar de ser una pieza rellena, esta sección no resultó fácil de manipular.

En el caso del molde de silicón se probaron con diferentes cortes para el llenado. Por un lado, en la Figura 5.3 una matriz con dos líneas de partición una transversal y otra perpendicular a ésta.

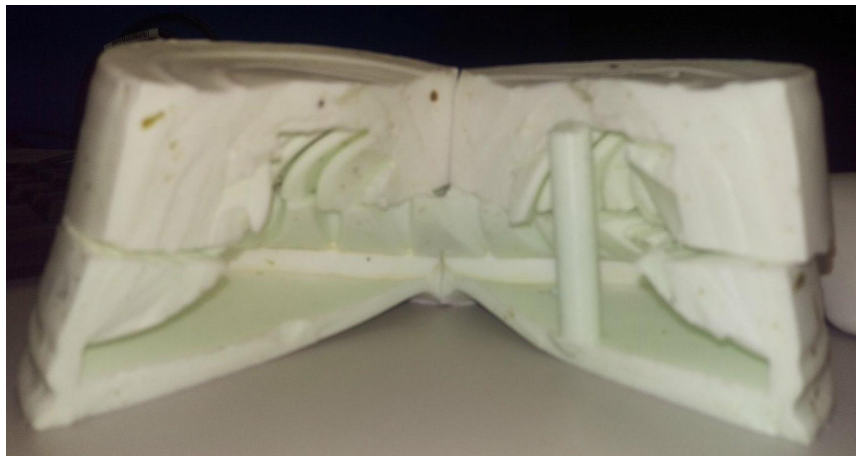


Figura 5.3 Matriz con dos líneas de partición.

En la Figura 5.4, la matriz que resultó ser la idónea con solo una línea de partición y sin el poste que corresponde al orificio del barreno.



Figura 5.4 Matriz con una línea de partición.

Con dos líneas de partición se presentaron problemas para el llenado, el primero de estos era colocar el poste de manera vertical y sin inclinación, para que en el llenado con cera no se moviera. Al tener cuatro partes, era muy complicado poder colocarlo en el centro y que además, al unir las, no hubiera escurrimientos de cera y ningún desfase. Debido a todas estas complicaciones, se omitió el orificio del barreno en el segundo modelo con solo una línea de partición, donde la única dificultad se presentó al llenar la zona de los álabes. Por esta razón se optó por llenar cada álabe individualmente con cera.

5.2. Modelos en cera.

Para el modelo de 13 álabes la cera empleada fue de la marca Westech cuya principal composición es cera de petróleo, cera natural, resinas sintéticas y naturales y distintos componentes orgánicos, su punto de fusión se encuentra de 85 . 90°C. Al ser fundida por arriba de este rango, se presentaron problemas como al ser demasiado líquida, no alcanzaba a solidificar dentro de la zona de los álabes, escurriendo al centro del molde; por debajo de este punto con consistencia pastosa, no fluía lo suficiente para llenar esta zona y por lo tanto, solidificaba fuera de los álabes. Encontrar la temperatura ideal de la cera fue un punto crítico, por lo que a los 95°C resultó ser la ideal.

A pesar de llenar el molde a esta temperatura no se logró llenar completamente la matriz. El extremo de algunos álabes continuó presentando defectos como se puede observar en la Figura 5.5.



Figura 5.5 Defectos modelo en cera.

Se detectó que la zona en la cual no se llenaban correctamente los álabes correspondía a la sección cercana a la línea de partición debido al gran peso que tenía todo el molde de silicón, haciendo mayor presión en esta zona, por lo que se optó por llenar individualmente cada álabe. Esto fue, tomando cada mitad y llenando por separado cada sección para al final unir las y terminar de vaciar la cera. Con esto se logró que máximo tres álabes resultaran con defectos. Como se mencionó, estos defectos se corrigieron colocando pequeños trozos delgados de cera la cual era colocada sobre la superficie a rellenar y se manipulaba hasta conseguir completar cada álabe. En el caso de la línea de partición y de zonas donde se presentaban bordes irregulares, solo era necesario calentar una cucharilla y pasar sobre la zona para eliminarlas.

En el modelo de 5 álabes, se empleó una cera para modelar con la cual solo se tuvo el problema de que al llenar el molde de silicón era necesario verter un poco más debido a la contracción que presentaba en el centro. La pieza que se obtuvo de esta prueba fue fácil de sacar del silicón y solo uno de los álabes se rompió debido a las secciones tan delgadas, logrando corregirlo calentándolo un cautín y ejerciendo presión en la zona; en la línea de partición solo fue necesario emplear un tallador.

5.3. Capa refractaria.

En la formación de la capa cerámica, se emplearon distintos lodos:

- Primer mezcla refractaria. Estucado en zirconio, para que la superficie quede lo más lisa posible.
- Segunda mezcla refractaria. Estucado arena malla 250, baño en lodo. Formación de segunda y tercera capa.
- Tercera mezcla refractaria. Estucado arena malla más grande, baño de lodo. Se forma cuarta y quinta capa.

Cada uno de las mezclas refractarias permanece en agitación así como mantienen cierta viscosidad. Entre cada capa aplicada hay un tiempo de secado que varía de 2 a 4 horas, el refractario queda como en la Figura 5.6. Se mantiene un control de temperatura y humedad.

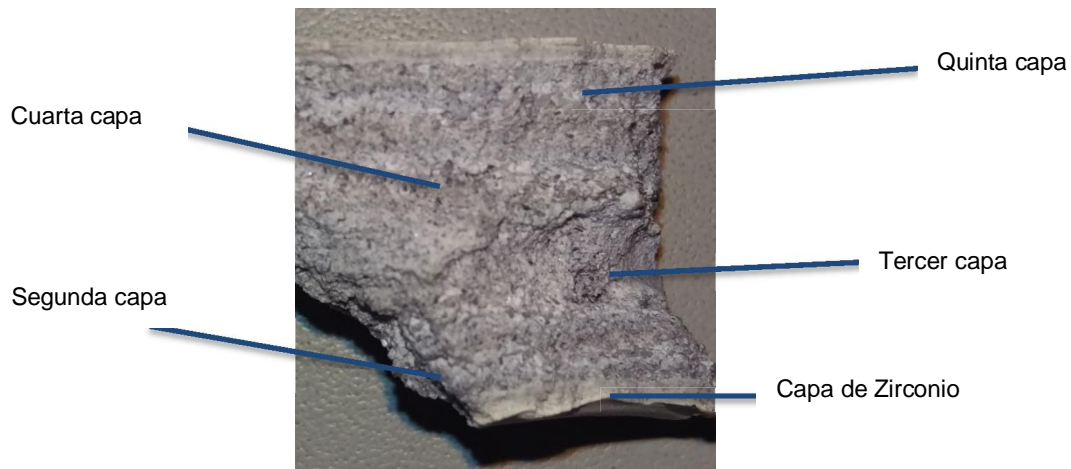


Figura 5.6 Capas de cerámico.

En el impulsor de 5 álabes, se produjo la cáscara con capas de yeso, hasta tener un espesor de 2cm aproximadamente, el principal problema se produjo en la zona inferior del rotor, donde fue complicado alcanzar el espesor.

Una vez que se ha obtenido la cáscara cerámica, se procedió a retirar la cera, esto dentro de una autoclave, teniendo como resultado una cavidad donde sería posible verter la aleación fundida. Es importante que la cáscara refractaria sea

secada para que adquiriera una mayor resistencia y además, la cera remanente sea eliminada, previniendo con esto que las piezas finales tengan defectos.

En la cáscara obtenida en laboratorio, se calentó girando la pieza cada 20min para que no quedara ninguna zona sin calentar y además, el secado fuera lento y no generara grietas en el mismo. Sin embargo, al ir quemando la cera, hubo una sección en la cual, al estar en contacto directo con la flama, tuvo una rápida evaporación de agua (contenida en la preparación del yeso) causando la fractura de la cáscara como se muestra en la Figura 5.7.



Figura 5.7 Grietas en el molde de yeso.

La sección oscura es importante en el proceso de descerado, ya que nos indica que aún hay remanente de cera en la cáscara de yeso. Una tonalidad grisácea o blanca, es la característica principal que presenta una cáscara de yeso sin rastro de cera.

5.4. Rotor colado y defectos.

Antes de la colada, es necesario un precalentamiento para evitar el choque térmico y además, esto ayude a que el metal fundido fluya con mayor facilidad dentro de la cavidad. Una vez solidificado todo el árbol, se retiró el cerámico y se cortaron cada uno de los rotores, obteniendo piezas como el de la Figura 5.8, en donde se señalan sus defectos.

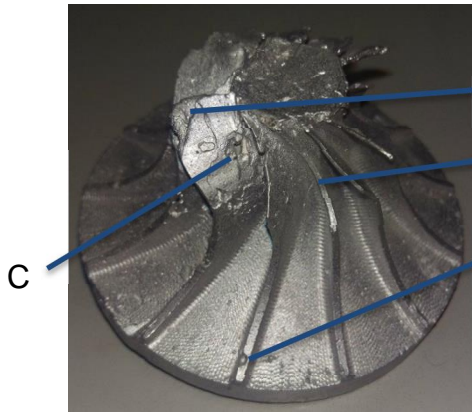


Figura 5.8 Rotor colado de 13 álabes.

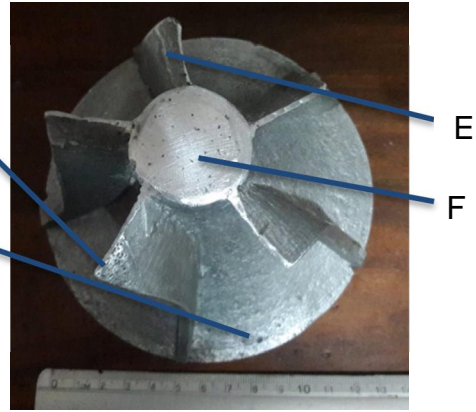


Figura 5.9 Rotor colado de 5 álabes

Estos rotores tuvieron los siguientes defectos:

- A) Flexión de la sección crítica.
- B) Rompimiento del modelo de cera.
- C) Llenado deficiente en la sección crítica.
- D) Aire en el modelo de cera (cavitación).
- E) Línea del molde de cera.
- F) Poros.

La flexión de la zona crítica es debida principalmente al espesor tan delgado que presenta. La aparición de este defecto puede provenir desde el modelo de cera donde no se haya permitido una completa solidificación en el molde y ser extraído antes de conseguirlo, es decir, un mal manejo de la pieza de cera y por otro lado, se pudo deber al peso que adquirió al colocar las capas de estuco y lodo.

El rompimiento del modelo de cera se puede identificar claramente al tener la pieza solidificada y localizado en la sección correspondiente al álabe, una fractura con borde liso. Se descarta el rompimiento después de la colada ya que el borde tiene una superficie lisa gracias a que estuvo en contacto con la arena de zirconio.

El caso de llenado deficiente se pudo deber a dos situaciones: la primera de ellas, nuevamente a un error proveniente desde el modelo de cera, donde la sección no se haya modelado de la manera adecuada y esta se haya fracturado antes de

recibir el baño de material refractario, dando paso a que las zonas donde hubiera un faltante de cera se llenaran con la mezcla refractaria y estuco; la segunda causa probable es que la temperatura de colada fuera inferior impidiendo que el material fundido fluyera antes de solidificar impidiendo llenado total de la sección, incluso también que la zona del álabe fuera más delgado que el diseño, provocando de la misma manera que el líquido no lograra fluir hasta esa zona.

El defecto debido al aire atrapado en el modelo de cera que se identifica por la forma esférica en la pieza colada. Este defecto posiblemente no se identificó después de tener la pieza de cera, ya que probablemente en la superficie presentaba una capa muy delgada de cera y hasta después de rectificar las zonas con superficie irregular con la cucharilla caliente esta capa se haya retirado dejando el hueco en la cera.

Se identifica una línea que no fue eliminada en el modelo de cera, lo que ocasiona que en la pieza de aluminio, se presente como defecto. Es causada por el molde de silicón, en el cual hubo un agrietamiento y la cera llenó. Durante la eliminación de bordes irregulares de la pieza en cera, faltó hacer la corrección en esta zona.

Poros solo en el caso del rotor de 5 álabes, ocasionados por un secado deficiente del molde de yeso y los cuales pueden ser prevenidos secando el molde de manera uniforme y a temperatura controlada, para así también evitar agrietamientos. Es importante señalar que solo hubo presencia de este defecto en esta pieza, ya que en el rotor de 13 álabes la adición de desgasificante fue la adecuada.

5.5. Análisis metalográfico y dureza.

En esta sección se puede ver el efecto que tiene el agregar el refinador y el uso de un desgasificante a través del análisis de las Figuras 5.10 a 5.13.

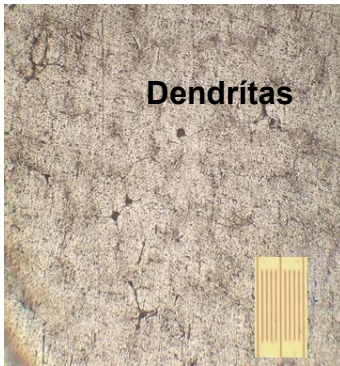


Figura 5.10 Microestructura 50X de 6061 como colada, presencia de dendritas.



Figura 5.11 Microestructura 100X de 6061 como colada.

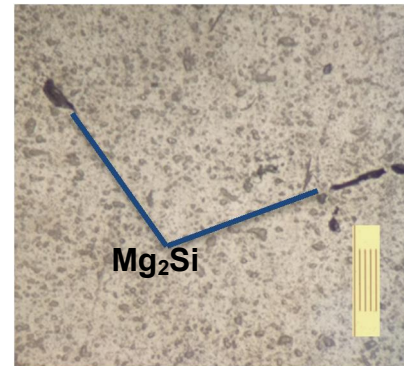


Figura 5.12 Microestructura a 400X de 6061 como colada, presencia de precipitados.

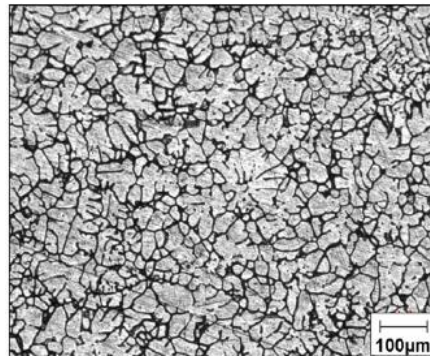


Figura 5.13 Microestructura Al6061 como pieza de colada [41].

Como se muestra en las Figura 5.8, la pieza de colada muestra dendritas y de tamaño muy heterogéneo que al compararlo con la Figura 5.11, nos da resultado similar. Las zonas de color más claro correspondientes a dendritas son de Al, mientras que en la Figura 5.10 se muestra la presencia del precipitado Mg₂Si caracterizados de color oscuro. No se observa la presencia de ninguna otra fase, lo que corresponde con la composición química de la aleación 6061 (Tabla 3.2) con un contenido alto de Al-Mg y Si.

En ninguna de las Figuras se observa la presencia de poros lo que indica que la adición del desgasificante C₂Cl₆ resultó efectiva en la pieza y que además el diseño del sistema de alimentación provocó que los rechupes se localizaran tanto en los cuellos como en bajada.

De los datos obtenidos de dureza dan como resultado 38.5HB lo que corresponde a la dureza de la aleación antes de ser tratada térmicamente, es decir, a la aleación 6061. Este dato es importante, ya que nos permite saber que después de que la pieza colada solidifica, pierde las propiedades adquiridas después del conformado y del tratamiento térmico.

Capítulo 6 Conclusiones y trabajo futuro.

El proceso de cera perdida permite obtener el rotor radial inflow de una microturbina en aleación 6061 sin defectos como poros o rechupes; con diseños que implican secciones muy delgadas como los álabes presentando como desventaja, que al no tener un correcto manejo de la cera así como de un mal seccionamiento de la matriz una pieza final con defectos como secciones incompletas.

La manufactura 3D permite diseñar prototipos de gran complejidad, tamaño variado y con secciones delgadas, que en caso de resultar ineficaces para el proceso de cera perdida, puede proporcionar la ventaja de ser modificada solucionando los problemas que se vayan presentando

Como trabajo futuro, se puede someter a tratamiento térmico el rotor radial inflow para que adquiera las propiedades necesarias como dureza para ser funcional.

Capítulo 7 Referencias.

[1] Calzada, R., Olivares, J. (2015). Conceptos de geotermia para ingenieros petroleros. Tesis de licenciatura. UNAM. Ciudad de México.

[2] Empresa Nacional del Petróleo. (2015). ENAP and Enel Green Power begin work in Chile on the first geothermal plant in South America. 30 de enero del 2018. Sitio web: <https://www.enap.cl/>

[3] Mendoza, M. (2016). Selección del fluido de trabajo para el ciclo binario de evaporación instantánea (CBEI). Tesis de licenciatura. UNAM. Ciudad de México.

[4] Comisión Federal de Electricidad (CFE). (2018). ¿Qué es la geotermia?. Recuperado el 3 de febrero del 2018, de <http://www.cfe.gob.mx/cerroprieto/Documents/Yacimiento%20Geot%C3%A9rmico.pdf>

[5] Ramírez, R. (2016). Refrigeración térmica con geotermia de baja entalpía. Tesis de Licenciatura. UNAM. Ciudad de México.

[6] Benítez, M. (2015). Instrumentación electrónica tolerante a fallas para ciclo Binario de Evaporación Instantánea CBEI-iiDEA. Tesis de licenciatura. UNAM. Ciudad de México.

[7] Breeze, P. (2016). Gas-turbine power generation. Academic Press, p. 1-32

[8] .Energiza. (2011). Turbinas de vapor. Renovetec. Año 1. España, p. 3-6.

[9] Soares, C. (2007). Microturbinas. Applications for Distributed Energy Systems, p. 21-30.

[10] BorgWarner Turbo Systems. (2018). Diseño y función de un turbocompresor: turbine. Recuperado el 30 de enero del 2018, de <http://www.turbos.bwauto.com/products/turbochargerTurbine.aspx>.

[11] Spadacini C., Frassinetti, M., Hinde, A., Penati, S., Quaia, M., Rizzi, D. and Serafino, A. (2015). The first Geothermal Organic Radial Outflow Turbines. Proceedings World Geothermal Congress.

[12] Almadoz, B., Mongelos, M., Pellejero, I. (2017). Apuntes de Máquinas Hidráulicas. España. Escuela Universitaria Politécnica.

[13] Radial Flow Turbine Impeller. (2018). Radial Turbine. Recuperado el 23 de enero del 2018, de https://imagemag.ru/img-ba_radial-flow-turbine-impeller.html

[14] Schvab, L. (2011). Máquinas y herramientas. Instituto Nacional de Educación Tecnológica. Argentina, p. 8-15.

[15] Lasemi, Ali., Xue, D., Gu, P. (2010). Recent development in CNC machining of freeform surfaces: A state-of-the art review. Computer-Aided Design. 42, p. 641-654.

[16] Kumar, S., Kruh, J. (2010). Composites by rapid prototyping technology. Material and design. 31, p. 850-856.

[17] Santos E, Shiomi M, Osakada K, Laoui T. (2006). Rapid manufacturing of metal components by laser forming. International Journal of Machine Tools and Manufacture, p. 46.

[18] Yasa E., Kruth J. (2011). Application of laser re-melting on selective laser melting parts. Advances in Production Engineering and Management, p. 259-270.

[19] Manufacturing guide. (2018). Selective Laser Sintering SLS. Recuperado el 23 de enero del 2018, de <https://www.manufacturingguide.com/en/selective-laser-sintering-sls>

[20] Regenfuss, P., Ebert, R., Exner, H. (2007). Laser micro sintering a versatile instrument for the generation of microparts. Laser journal, p.1.

[21] Digital Engineering. (2018). EOS and 3D Micromac Partner to Form 3D MicroPrint, New Micro Laser Sintering Company. Recuperado el 23 de enero del 2018, de <http://www.rapidreadytech.com/2013/12/eos-and-3d-micromac-partner-to-form-3d-microprint-new-micro-laser-sintering-company/>

[22] Bremen, S., Meiners, W., Diatlov, A. (2012). Selective laser melting. *Laser Technik Journal*, p. 2.

[23] Tooling and production. (2018). New 3D printer offers Selective Laser Melting for Small Metal Parts. Recuperado el 23 de enero del 2018, de http://www.toolingandproduction.com/cms/tap/opens/articleview.php?nid=3&bid=525&aid=2245&eid=%7B%7B%7Bemail_address%7D%7D%7D&lk=1&sr=R&tp=Y

[24] Costa, E., Shiomi, M., Osakada, K., Laoui, T. (2006). Rapid manufacturing of metal components by laser forming. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 46, p. 1459. 146.

[25] Laser Cladding Technology. (2018). Laser cladding Process. Recuperado el 28 de enero del 2018, de <http://www.lasercladding.co.uk/Laser-Cladding-Process.aspx>

[26] Zhang K, Liu W, Shang X. (2007). Research on the processing experiments of laser metal deposition shaping. *Optics & Laser Technology*, p. 549. 557.

[27] Griffiths, L. (2014). Accelerating 3D Technologies. Recuperado el 28 de enero del 2018, de <https://www.tctmagazine.com/3d-printing-news/cybaman-to-launch-new-machine-at-euromold/>

[28] ASM Metals Handbook Vol. 15 Casting. (1992). 9° edición.

[29]. Ultimate resources on metal casting. (2010). Green sand casting. Recuperado el 29 de diciembre 2018. Sitio web: http://www.industrialmetalcastings.com/casting_green_sand_casting.html

[30] Willman industries Inc. (2018) What are Green sand casting?. Recuperado el 28 de diciembre 2018. Sitio web: <https://willmanind.com/what-are-green-sand-castings/>

[31] Pattnaik S, Karunakar D, Jha P. (2012). Developments in investment casting process- A review. *Journal of Materials Processing Technology*, p. 2332-2348.

[32] Investment Casting Institute. (2018). What is Investment Casting?. Recuperado el 8 de enero 2018, de Investment Casting Institute. <https://www.investmentcasting.org/>

[33] Moran, M. (1998). Optimización de las técnicas utilizadas en el proceso de fundición a la cera perdida en la producción de piezas artesanales de bronce. Tesis de licenciatura. UNAM. Ciudad de México.

[34] Mancilla, E., Garduño, I., Cruz-Méndez, W., González-Rivera, C., Ramírez-Argáez, M., Ascanio, G. (2018). Estudio Hidrodinámico de Rotores-Inyectores sobre la Cinética de Desgasificado de Aluminio. Ingeniería Mecánica Tecnología y de Desarrollo. Vol. 6. No. 6, p. 441-446.

[35] King, F. (1992). El aluminio y sus aleaciones. Limusa. México, p. 149, 188.

[36] Domínguez, G. (2016). Análisis del material y predicción de falla de la microturbina de un turbo cargador modificado para un ciclo geotérmico. México. UNAM. Tesis de maestría en Ciencia e Ingeniería en Materiales.

[37] Peirs, J. (2004). A microturbine for electric power generation. Science Direct. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924424704000081>. Febrero, 2017.

[38] ASM Metals Handbook. Vol.2 Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Pure Metals. (1992). 9° edición. 27, p. 115.

[39] Chalekar A., Somatkar A., Chinchankar S. (2015). Designing of Feeding system for Investment Casting. Journal of Mechanical Eng., p. 15-18.

[40] Kehl G. (1949). The Principles of Metallographic Laboratory Practice. 3° edición. Mc Graw Hill. USA., p. 424.

[41] Ramesh, C., Srinivasa P., Keshavamurthy R., Koppad, P. (2001). Abrasive wear behavior of Ni-P coated Si₃N₄ reinforced Al6061 composites. Journal of materials Processing Technology, p. 1423-1431.