



REPUBLICA DE CUBA
MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR
INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO DE MOA
Dr. Antonio Núñez Jiménez
MAESTRÍA DE ELECTROMECAÁNICA

TESIS EN OPCIÓN AL TÍTULO DE
INGENIERO MECANICO


Título: Análisis de la rotura del árbol de la bomba centrífuga modelo π PB π 63 de la UBP de Recuperación de Amoniaco, de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”

Autor: Carlos Yander Lamoru Cutiño

Tutor: Ms.C. Jorge Reyes De la Cruz

Moa 2017

Año 59 de la Revolución



“La independencia depende del desarrollo, depende de la tecnología, depende de la ciencia en el mundo de hoy”.

Fidel Castro Ruz, 1990.

Declaración de autoridad

Yo: Carlos Yander Lamoru Cutiño

Autor de este trabajo de diploma, dispongo su propiedad intelectual a favor del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa "Dr. Antonio Núñez Jiménez", el cual puede hacer uso del mismo con la finalidad que estime conveniente.

Carlos Yander Lamoru Cutiño

Ms.C. Jorge Luis Reyes de la Cruz

Dedicatoria

Dedico este trabajo a aquellas personas que durante estos 5 largos años se mantuvieron a mi lado, me apoyaron y creyeron en mí incluso en los momentos en que pensé que este sueño no sería posible.

1. A mis padres, Idalmis, Yudelkis y Carlos, porque sé que no habrá manera en el mundo de corresponderles todo el esfuerzo que realizaron por mí; por el amor, la comprensión, y el apoyo que recibí de ellos en el camino por alcanzar esta meta.
2. A mis hermanos, que me siguen incondicionalmente a donde quiera y siempre están dispuestos a ayudarme.
3. A mi tío Carlos Manuel (niño) y su esposa Arelis, que, aunque estén lejos siempre me aconsejan y velan por que sea una persona de bien.
4. A Daymis por estar siempre pendiente de mí y confiar en mi cuando nadie lo hizo.
5. A mis amigos de toda la vida: Jorge Antonio Chacón, Darién Frometa.

Agradecimientos

A la Revolución, por darme la oportunidad de convertirme en un profesional y ser una persona de bien.

A mis padres, a mis hermanos, a mi familia por su constante apoyo, y preocupación.






A mi tutor por su gran apoyo incondicional para la confección de este Trabajo de Diploma.

A mi vecino Eidier Góngora Blet por su colaboración para la realización de este trabajo de diploma.

A mis profesores, por formarme como buen estudiante y prepararme para el trabajo y para la vida.

A mis amigos y compañeros de clases, por compartir tan gratos momentos de la vida estudiantil como son: Luis Raymon Terry, Geiser Góngora Loforte, Graciela Andalia Linares, Roiberto Lambert Piletta, Javier Carballo, Juan Enrique, Alejandro Mendosa, en fin, a todos los que me apoyaron durante estos 5 años.

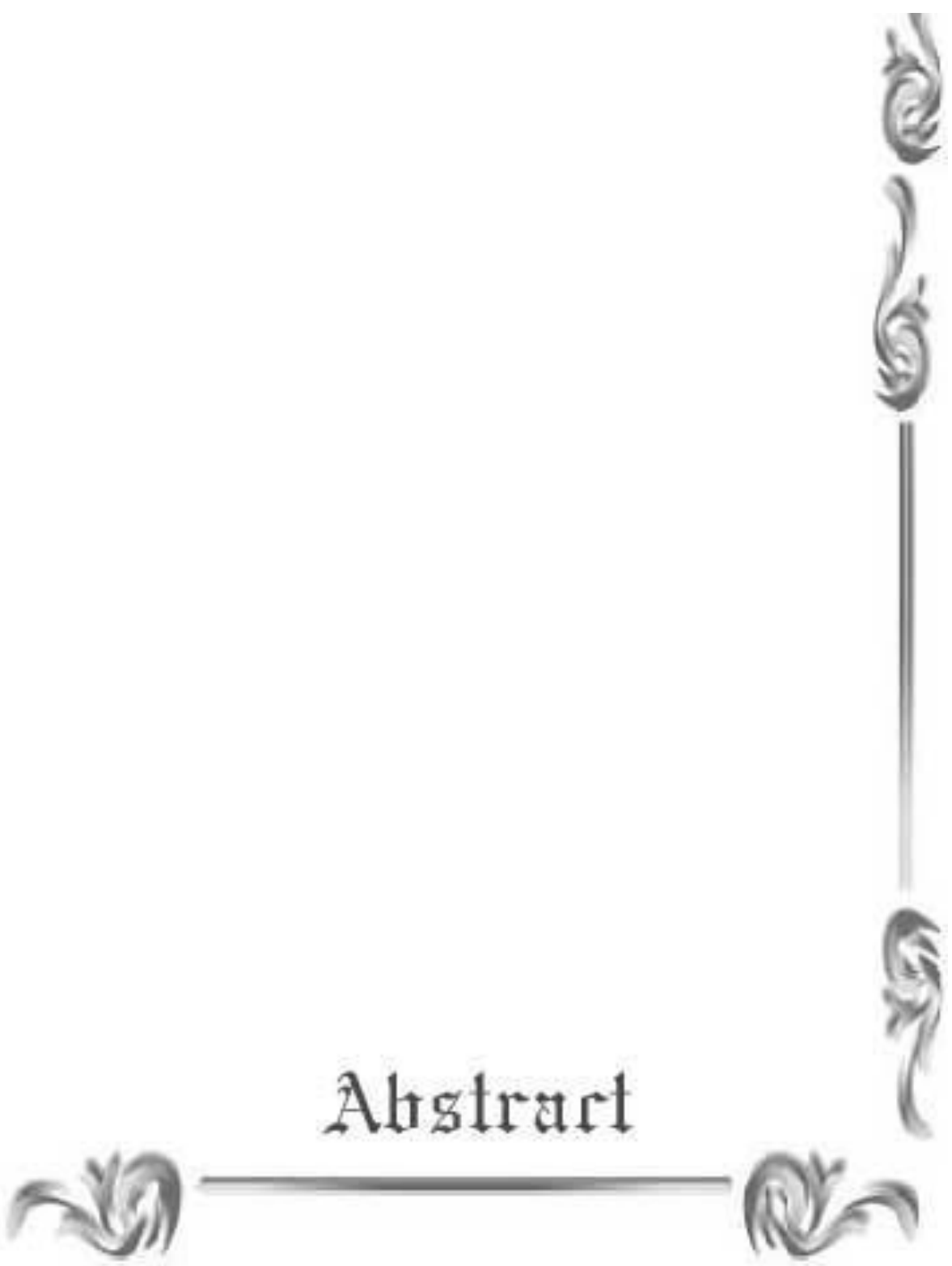
A todos, muchas gracias.



Resumen

RESUMEN

El objetivo principal de este trabajo de diploma es establecer mediante la metodología de cálculo el diseño del árbol que pertenece a la bomba Hacoc (Bomba centrífuga de posición vertical). Además, se dan a conocer las principales características técnicas de la máquina, donde está ubicada, las características técnicas del árbol que constituye una pieza fundamental en esta bomba, durante la investigación de este trabajo se demostró que el material AISI 4340 es un material adecuado para la construcción de ejes y arboles ya que posee una gran dureza y es resistente al desgaste y la fatiga del material que son las causas fundamentales que provocan la ruptura del árbol analizado. Se realizó una breve valoración económica y valoración del impacto medio ambiental.

A decorative L-shaped border is positioned on the right and bottom edges of the page. It consists of a vertical line on the right and a horizontal line at the bottom, both ending in ornate, symmetrical floral or scrollwork motifs. The word "Abstract" is centered within the horizontal line.

Abstract

ABSTRACT

The main objective of this diploma work is to settle down by means of the calculation methodology the design of the tree that belongs to the bomb Hacoc (Bomb centrifuges of vertical position). Also, they are given to know the main technical characteristics of the machine, where it is located, the technical characteristics of the tree that it constitutes a fundamental piece in this bomb, during the investigation of this work were demonstrated that the material AISI 4340 are an appropriate material for the construction of axes and hoist since it possesses a great hardness and it is resistant to the waste and the fatigue of the material that are the fundamental causes that cause the rupture of the analyzed tree. He was carried out a brief economic valuation and valuation of the half environmental impact.







Índice

Índice

INTRODUCCIÓN.....	1
Capítulo I Marco teórico	4
1.1. Introducción.....	4
1.2. Esquema tecnológico de la empresa Ernesto Che Guevara	4
1.3. Estado del arte	5
1.4. Trabajos precedentes.....	7
1.5. Descripción del flujo tecnológico de la UBP de Recuperación de amoniaco.....	8
1.6. Selección de bombas centrífugas para el proceso de transporte de fluidos.....	10
1.7. Principio de funcionamiento de las bombas centrífugas de posición vertical.	11
1.8. Afectaciones más comunes en este tipo de bomba.	12
1.9. Características del árbol de la bomba.	12
1.9.1. Características de los árboles y ejes.	12
1.10. Causas que provocan la falla de la pieza.....	13
1.10.1. Incidencia del desgaste y fatiga del material en el árbol de la bomba centrífuga hacoc.....	13
1.11. Determinación la ruptura del árbol con la utilización de herramienta computacional como el SolidWorks.	14
1.12. Conclusiones del capítulo I.	16
Capítulo II. Materiales y métodos	16
2.1. Introducción.	16
2.2. Mediciones desarrolladas	16
2.2.1- Herramientas de medición utilizadas en la investigación	17
2.3. Determinación metodológica del rediseño del árbol de la bomba.....	18
2.3.1. Cálculo preliminar.....	19
2.3.2. Peso del impelente.....	19
2.3.3. Cálculo del momento torsor aplicado.	20
2.3.4. Cálculo del diámetro preliminar.	20
2.3.5. Solicitaciones presentes en el árbol.	20
2.3.6. Cálculo aproximado o de proyecto.	21
2.3.7. Cálculo del momento equivalente.....	22
2.3.8. Calculo del diámetro para la sección más peligrosa.....	22
2.4. Metodología para la selección de cojinetes.	23
2.4.1. Escoger tipo y medida de cojinete.....	23
2.4.2. Determinación de las componentes axiales de las fuerzas radiales.....	24
2.4.3. Cálculo de la carga axial completa sobre los cojinetes.	24

2.4.4. Determinación de precisión para el parámetro “e”	25
2.4.5. Calculo de los coeficientes de carga radial “X” y axial “Y” para el cojinete más cargado.	25
2.4.6. Determinación de la carga equivalente.	25
2.4.7. Cálculo de la longevidad teórica.....	26
2.4.8. Determinación de la longevidad en horas de servicio.	26
2.4.9. Comparación de la longevidad.	26
2.5. Determinación a través de la simulación.....	26
2.5.1. Modelación del árbol.	27
2.6- Conclusiones del capítulo II.	28
Capítulo III. Análisis del resultado	29
3.1. Introducción.....	29
3.2. Resultados.	29
3.2.2. Cálculo aproximado o de proyecto.	31
3.2.3. Diámetro aproximado o de proyecto.....	31
3.3. Escoger el tipo y las medidas de los cojinetes.....	32
3.3.1. Longevidad de los cojinetes.	32
3.4. Modelación y simulación del árbol.	33
3.5. Evaluación o valoración económica.....	35
3.6. Evaluación ambiental.	36
3.7. Conclusiones del capítulo III.	37
Conclusiones generales	38
Recomendaciones.....	39
Bibliografía.....	40
Anexos	43



Introducción

INTRODUCCIÓN

Desde los tiempos más antiguos el hombre ha tenido grandes necesidades de realizar diferentes tareas, como consecuencia de la acumulación de estas tareas y con la gran capacidad de razonamiento e inteligencia que posee se vio en la obligación de inventar herramientas y diferentes métodos que le dieran solución a su problema. Estas técnicas, a través de los años han ido perfeccionando junto con la tecnología, formando parte de nuestra sociedad. Hoy en día existe una gran competencia en el mercado industrial por la calidad requerida de los productos, esto es muy importante para intentar competir con las grandes empresas, para distribuir nuestros productos y aumentar el ingreso económico.

Unos de estos logros son las dos empresas exportadoras de níquel que existen en nuestro país la empresa Pedro Soto Alba y la empresa Ernesto Che Guevara que su proceso niquelífero es el proceso CAROM, donde el mineral es extraído de las minas por los retro cavadores y transportados por los volvos hasta las diferentes plantas de la empresa para la extracción del níquel. Unas de estas es la Unidad Básica de Producción (UBP) recuperación de amoniaco donde se encuentran diferentes bombas de distintos tipos y tamaños, que son destinadas para el bombeo de líquidos, dentro de esta instalación encontramos la bomba Hacoc, la misma se utiliza para el bombeo de líquidos residuales, esta presenta baja eficiencia debido a su deterioro progresivo en el árbol.

Según (Pérez,2004), durante el funcionamiento de la bomba, estas pieza y demás mecanismos están sometidos a una serie de factores que provocan su desgaste, estos pueden ser desgastes normales que consisten en las pérdidas de metal en la superficie de la pieza, debido a la acción mecánica del elemento que interactúa con ella. En cuanto a las roturas, estas surgen debido a la acción de las fuerzas de fricción, de las cargas elevadas, a consecuencia del agrietamiento del metal, de la alta temperatura que rodea el medio, la corrosión.

Para prever estos factores en las piezas, es necesario conocer cuáles son las causas que lo provocan y de esta forma lograr una mayor longevidad de las piezas y mecanismos,

tomando las medidas pertinentes de mantenimiento. Teniendo en cuenta que el desgaste en la máquina ocasiona gastos de reparación y, por consiguiente, encarece la explotación de estas; además, el paro de la esta bomba para su reparación reduce la productividad de la empresa.

La situación problemática de la investigación es:

La bomba hacoc no está trabajando con la calidad requerida para el proceso de extracción de níquel, debido al deterioro progresivo del árbol de la misma, que sufre diferentes fallas por desgastes y rotura en la zona de trabajo, fallas que ocasiona que esta quede fuera de explotación y como resultado la producción se vea afectada, trayendo consigo una pérdida de las ganancias, las cuáles con el tiempo pueden ser significativas, igualmente si estos desechos no pueden ser bombeados los mismos se derramarían en el suelo teniendo como consecuencia daños en el medio ambiente.

Teniendo en cuenta las deficiencias antes expuestas, se define como **problema:**

Frecuente rotura del árbol de la bomba centrífuga de posición vertical modelo $\pi P B \pi$ 63.

Como **objeto de estudio** de la investigación tenemos:

Árbol de la bomba centrífuga de posición vertical de la UBP recuperación de amoniaco de la empresa comandante Ernesto Che Guevara.

Como **objetivo** tenemos:

Rediseñar el árbol con un material que permita obtener un buen desempeño y eficiencia en la bomba.

Estableciendo como **campo de acción** de la investigación se plantea:

Rediseño del árbol de la bomba centrífuga de posición vertical modelo $\pi P B \pi$ 63.

Para lograr el cumplimiento del objetivo propuesto, se plantean los siguientes **objetivos específicos de trabajo:**

- 1- Desarrollar un estudio que muestre los fundamentos teóricos de diseño del árbol de la bomba centrífuga de posición vertical de la empresa "Ernesto che Guevara"



- 2- Establecer las metodologías de cálculo para comprobar el diseño mecánico del árbol y los cojinetes de la bomba centrífuga de posición vertical Hacoc de la UBP Recuperación de amoniaco.
- 3- Realizar el análisis de los resultados, la valoración económica y el impacto medioambiental.

Sobre la base del problema a resolver se establece la siguiente **hipótesis**:




Si se rediseña el árbol, con un nuevo material más resistente, se incrementarán los años de vida útil del mismo, obteniendo así una gran efectividad en la producción de la (UBP) recuperación de amoniaco de la "Empresa Ernesto che Guevara"

Para lograr el cumplimiento de los objetivos específicos propuesto, se plantean las siguientes **tareas de trabajo**:

1. Rediseño del árbol de la bomba con un nuevo material que permita alargar la vida útil del mismo, para obtener un desempeño eficiente en la producción.
2. Modelación del árbol de la bomba Hacoc mediante los softwares computacionales que permitan ver la pieza en tiempo real.
3. Evaluación de los resultados, valoración económica e impacto medioambiental.



Capítulo 1



Capítulo I Marco teórico

1.1. Introducción

En la empresa productora de Níquel “Comandante Ernesto che Guevara” el mineral para la obtención del níquel, pasa por muchos procesos hasta llegar a combatirse en el producto final. Después de ser extraído por las retocadoras y ser transportados por los camiones volvos a las diferentes plantas de la empresa, llega a la (UBP) recuperación de amoniaco. Dentro de la misma, en unas de su instalación de bombeo se encuentra la bomba centrífuga de posición vertical Hacoc, la misma es la encargada del bombeo de líquidos residuales (cola) y mediante una red de tuberías llevarlos hacia otra instalación donde serán desechados.

Esta bomba viene presentando un deterioro progresivo en su árbol, debido a diferentes fallas, las cuales se hace muy constantes, por lo que tener el conocimiento de los factores que la provocan se hace necesario ya que obtiene la información correcta para mejorar el diseño y así evitar grandes pérdidas en la industria.

Este capítulo tiene como **Objetivo:** Desarrollar un estudio bibliográfico que muestre los fundamentos teóricos de diseño del árbol de la bomba centrífuga de posición vertical de la UBP recuperación de amoniaco de la empresa “Ernesto che Guevara”.

1.2. Esquema tecnológico de la empresa Ernesto Che Guevara

La fábrica de níquel comandante Ernesto Che Guevara se encuentra ubicada al norte del yacimiento mineral de Punta Gorda, provincia Holguín, en la costa norte, a 4 km de la ciudad de Moa, Cuba. Desde su puesta en marcha en enero de 1986, su explotación ha sido muy importante para la economía del país, lo que ha favorecido el desarrollo de la zona y el progreso económico y social al generar empleo e inversiones, la misma cuenta con un esquema tecnológico que está basado en la lixiviación carbonato - amoniacal del mineral reducido o proceso CARON.

La decisión de utilizar el proceso de lixiviación carbonato amoniaca se explica por las ventajas propias de esta tecnología y a pesar de que consume mucha energía eléctrica, tiene muchas ventajas en comparación con el proceso pirometalúrgico. Al mismo tiempo este proceso se realiza con un consumo relativamente pequeño de reactivos. El único reactivo que se utiliza en cantidades grandes es el amoníaco. El consumo del cual es necesario sólo para compensar las pérdidas mecánicas. Es un proceso continuo que se realiza en las condiciones de presión atmosférica. El equipamiento tecnológico del proceso se distingue por su sencilla y amplia utilización de los aparatos conocidos (hornos de soleras múltiples, espesadores, columnas de destilación).

Estas características favorecen la creación de una producción con alto nivel de mecanización y automatización. El esquema amoniaca admite la elaboración de la mezcla de los minerales lateríticos y serpentínicos, mientras que el esquema, por ejemplo, de lixiviación con el ácido sulfúrico permite solamente la elaboración de la fracción laterítica. En la empresa Comandante Ernesto Che Guevara en la (UBP) Recuperación de Amoníaco existen instalaciones industriales de hidrotransporte que su función es el bombeo de Desechos Lixiviado, el cual se succiona por un sistema de bombeo y es transportado por vía hidráulica.

Estas instalaciones trabajan en régimen cavitacional debido, entre otros factores a las altas temperaturas, densidad del fluido a transportar, la variedad de las propiedades físico mecánicas de estas mezclas, que les confiere propiedades específicas a los flujos en su movimiento por tuberías u otros dispositivos similares de transporte. Las soluciones amoniacaes están constituidas por, gas de alta solubilidad y fácil desprendimiento del líquido, lo que crea una nueva fase gaseosa que incide con fuerza en los parámetros de flujo trifásico (conformadas por una mezcla sólido-líquido-gas). Reyes, (2016).

1.3. Estado del arte

Con el desarrollo y los adelantos de la humanidad en cuanto a la ciencia y las nuevas tecnologías se ha llegado a la conformación de una estructura industrial muy potente y arraigada firmemente, cuya ideología se dirige a la optimización y facilidad en el flujo de los procesos industriales teniendo muy claro la productividad de las plantas. Por tal motivo,

hoy en día podemos ser testigos de la creación de industrias que desarrollan tecnologías y actividades de producción muy complejas, pero que a su vez debido a los avances tecnológicos son sumamente fáciles de operar y controlar.

De acuerdo a lo anterior y a la necesidad de optimización y gestión de procesos se han creado muchas maquinaria y equipos que son de forma puntual los encargados de convertir la energía que se les suministra en trabajo notable para la planta y que a través de la instrumentación adecuada se les da el manejo y control que ellos requieren, Entre estas maquinarias de forma particular encontramos las bombas centrifugas de posición vertical, las cuales, debido a sus fundamentos operacionales son una de los equipos más representativos de la industria de hoy en día .

Este maravilloso invento tiene inicio desde tiempos antes de cristo, Cuando se daba el desarrollo cultural que se produjo en el reinado de Ptolomeo II Filadelfo y del cual tenemos evidencia en la Biblioteca de Alejandría, como consecuencia de este proceso se crea la bomba centrifuga, la cual se fundamenta en la conversión de la potencia de entrada (rotativa, motor) en energía cinética en el fluido por medio de un mecanismo giratorio, el impulsor. Es fascinante saber cómo un invento de tal antigüedad ha permanecido en el tiempo y se ha convertido en un equipo fundamental en el transporte de fluidos líquidos y acuosos, en las industrias, esta es la razón por la cual una vez se tengan funcionando se deben tener en óptimas condiciones de operación.

En correspondencia con lo planteado anteriormente, este trabajo de diploma tiene como línea de investigación, las bombas centrifugas de posición vertical las cuales son muy usadas en la industria para el bombeo de líquidos y el diseño de una de sus piezas fundamentales como es el caso del árbol.

Bombas centrifugas de posición vertical

Las Bombas centrífugas también llamadas Rotodinámicas, son siempre rotativas y son un tipo de bomba hidráulica que transforma la energía mecánica de un impulsor. El fluido entra por el centro del rodete, que dispone de unos álabes para conducir el fluido, y por

efecto de la fuerza centrífuga es impulsado hacia el exterior, donde es recogido por la carcasa o cuerpo de la bomba, que por el contorno su forma lo conduce hacia las tuberías de salida o hacia el siguiente rodete se basa en la ecuación de Euler y su elemento transmisor de energía se denomina impulsor rotatorio llamado rodete en energía cinética y potencial requeridas y es este elemento el que comunica energía al fluido en forma de energía cinética. Alvares, (2008).

Árbol de la bomba

El árbol es el encargado de transmitir la energía entregada por el motor hasta el impulsor, para el diseño de este tipo de pieza se utiliza materiales con alto contenido de carbono, que sean resistentes al desgaste, la fatiga y la corrosión del material ya que esta pieza está ubicada en máquinas que trabajan sumergidas en líquido y a muy altas temperaturas por lo general se utilizan material de acero cromo, níquel, molibdeno. Quezada, (2008).

1.4. Trabajos precedentes.

Una investigación científica de acuerdo con lo planteado por Fernández, (2003), en cualquier área del conocimiento debe siempre estar sustentada por la actividad teórica y empírica, de ahí que sea necesario utilizar los métodos que caracterizan a cada una de ellas para desarrollar científicamente las mismas a partir de una clara caracterización del objeto, del planteamiento del problema, la hipótesis, los objetivos, y las tareas. El estudio bibliográfico de este trabajo de diploma estuvo basado en dos puntos fundamentales: uno, relacionada con la temática (bombas centrífugas de posición vertical) y la otra; sobre las metodologías realizadas para el diseño de árboles y ejes.

Las bombas centrífugas son una de las máquinas más frecuentes en los procesos de lixiviación ácida y amoniacal para la producción de níquel, también se puede afirmar que son grandes consumidores de energía, es decir que un problema que disminuya su eficiencia trae aparejado un impacto negativo en los aspectos económicos y social según Pérez, (2004).

Además, resulto ser muy importante para la investigación el estudio realizado por González,(2007), donde hace referencia a la metodología de cálculos de árboles y ejes, donde plantea que Las formas constructivas de los árboles y de los ejes se determinan de acuerdo con el destino de estos elementos, según sea el carácter y la longitud de las cargas aplicadas sobre ellos, por el procedimiento que se emplea de sujeción de las piezas asentadas en ellos y de acuerdo con las condiciones del montaje del conjunto y la tecnología de su fabricación.

Según Palomino, (1999), entre los elementos de las máquinas rotatorias (bombas centrífugas) que más fallan se encuentra en los árboles o ejes, impulsores y rodamientos; esto se debe en gran medida a la cavitación cuando esta se encuentra en un alto grado. En este caso, la falla de los árboles se debe al desgaste y fatiga del material debido a las condiciones de trabajo de la máquina.

Otros trabajos de Pérez, (2000), dan un enfoque de cómo debe ser gestionada la protección ambiental en la práctica del mantenimiento industrial, destacando a éste como la función que más puede contribuir en las empresas a reducir los riesgos de impacto ambiental, dado que es la garantía de la fiabilidad de los equipos y es además donde se realizan gran número de operaciones que pueden producir impactos.

1.5. Descripción del flujo tecnológico de la UBP de Recuperación de amoniaco.

La empresa productora del níquel Ernesto Che Guevara, para la obtención de este preciado mineral responde a una estructura organizacional adecuada, comenzando desde la dirección general dela empresa, pasando a las demás direcciones y luego a las diferentes UBP para obtener así un adecuado flujo tecnológico en la producción como se muestra en la figura 1.1.

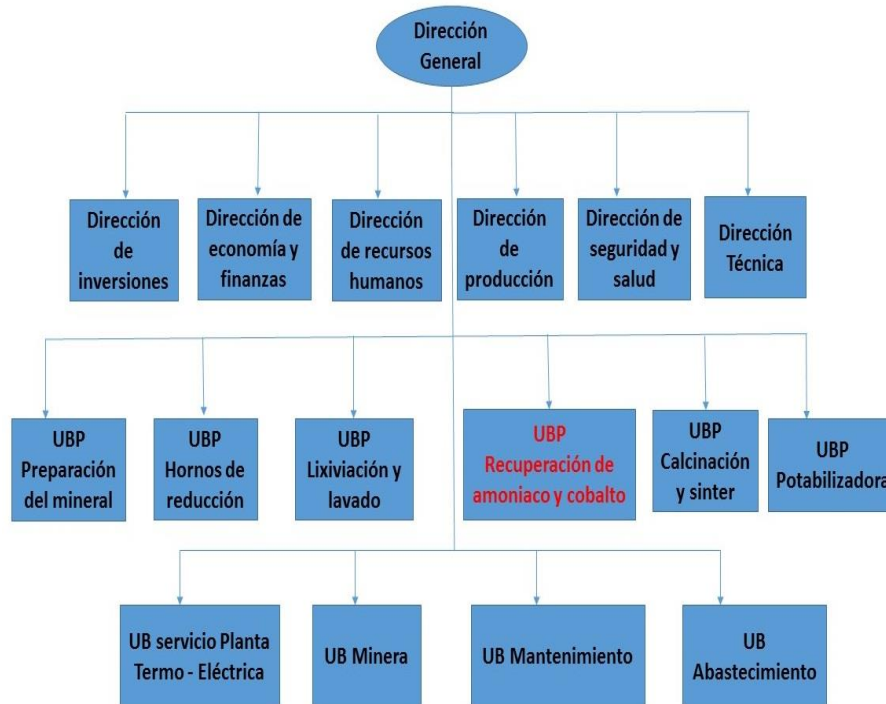


Figura 1.1. Estructura organizacional de la empresa comandante Ernesto Che Guevara.

Dentro de esta empresa se encuentran diferentes UBP donde una de ellas es la UBP recuperación de amoníaco y cobalto como se muestra en la figura anterior la misma responde a un flujo tecnológico, donde el licor producto de la I Etapa de la UBP de Lixiviación y Lavado se bombea hacia la sección de Recuperación de Amoníaco, recibándose en la serie de turbos que se encuentra en operación (existen tres series de turbos TB- 101, 102 y 103 y cada serie tiene tres tanques A, B y C) y de estos se bombea mediante las BO-104 A, B, C y D con capacidad 220 m³/h a los filtros de hojas FL-105 al 110, donde se disminuye el sólido en suspensión de 360 hasta ≤ 20 ppm o (20 mg/L).

El licor filtrado es almacenado en el tanque (TK -118) de 3 000 m³ y de este es bombeado a la sección de Separación de Cobalto. Desde el TK-118 el licor filtrado es bombeado por las bombas BO-121 E, F con capacidad de 280 a 320 m³/h y la bomba BO 121 H de 500 m³/h, hacia los tanques agitados TK-128, 129 y 130 C, de 70 m³ cada uno, ubicados en la plataforma de los turboaeradores de la III etapa de la UBP de Lixiviación y Lavado, a los que se le adiciona la pulpa recirculada desde el fondo de los sedimentadores SD 233/234

en condición de semilla. En estos tanques agitados se logra el intercambio iónico del Ni del sulfuro mixto con el Co contenido en el licor producto lográndose la reducción del Co^{+3} a Co^{+2} el que en este estado reaccionará con el NH_4HS en el reactor tubular. Colectivos de autores Moa, (2014).

Mediante este proceso en la instalación de bombeo los desechos lixiviados son bombeados por diferentes bombas de diferentes tipos y tamaños una de ellas es la bomba centrífuga de posición vertical modelo $\pi\text{PB}\pi$ 63 que se utiliza para trabajos de diferentes niveles de presiones de aguas, tiene una altura de 22,5 m y bombea 63 m^3 de líquido, se utiliza también para el bombeo libre, esta bomba trabaja sumergida en el líquido (desechos lixiviados). Tiene el motor ubicado a un nivel superior al de la bomba lo que posibilita que la bomba trabaje rodeada del líquido. La ventaja de estas bombas, es que requieren muy poco espacio horizontal que las hace insustituibles en estos pozos. Anexo 1.

1.6. Selección de bombas centrífugas para el proceso de transporte de fluidos.

La correcta selección de bomba, radica en conocer las condiciones en que trabajará la bomba. Además del caudal y la altura de elevación que requiere el sistema, se debe conocer otras características (redes de distribución, tipo de fluido a bombear, número de bombas que se requieren y tipo de arreglo, pérdidas totales por conducción, entre otras más), que serán la base para seleccionar la bomba adecuada que requiere el sistema. Una vez que se conoce todo lo referente al sistema, es decir, la altura total que se requiere que tenga la bomba a seleccionar (suma de la altura de elevación y las pérdidas por conducción), se produce a examinar diferentes catálogos de curvas de bombas y así, seleccionar la que nos ofrezca el más alto rendimiento a la velocidad de rotación que requerimos.

Se puede hacer una selección equivocada por no haber investigado los requisitos del sistema ni haber determinado cual debe ser la eficiencia. Una selección inadecuada de la bomba ocasiona que el caudal de extracción sea mayor o menor al programado, provocando que la carga a la que opera el motor no sea la correcta, obteniendo de esta forma lecturas muy altas o muy bajas en las eficiencias, es decir, la bomba trabajará fuera

de su punto de operación. Balcazar, (2013). La bomba seleccionada es una bomba centrífuga de posición vertical que se encuentra sumergida en líquido (desechos lixiviados).

1.7. Principio de funcionamiento de las bombas centrífugas de posición vertical.

Para bombas de gran caudal, la construcción vertical resulta en general más barata que la horizontal. Las bombas verticales se emplean normalmente en aplicaciones marinas, para aguas sucias, drenajes, irrigación, circulación de condensadores y otras aplicaciones con el mismo contenido de trabajo. La bomba que se está analizando es sumergible lo que elimina el inconveniente del cebado, por lo que el impulsor se halla continuamente, aún parado, rodeado por el líquido a impulsar y, por lo tanto, la bomba está en disposición de funcionar en cualquier momento. La aspiración, que es siempre por abajo, se hace a una cierta profundidad con respecto al nivel libre del líquido.

Si esta profundidad es menor de lo debido, 2 o 3 veces el diámetro del orificio de aspiración, se pueden crear en la superficie remolinos por cuyo centro se introduce aire en la bomba, con la consiguiente pérdida de caudal y deficiente funcionamiento. El eje del que van provistas estas bombas, va guiado normalmente por cojinetes de fricción separados a intervalos regulares (de 1,5 a 3 metros) y lubricados por aceite, grasa, o el mismo líquido bombeado. Desde un punto de vista mecánico, esta disposición presenta grandes inconvenientes con respecto a la horizontal. Kenneth, (2016).

Las bombas son inicialmente más caras y su mantenimiento mucho más elevado, ya que cualquier reparación exige el desmontaje de la bomba para izarla a la superficie. El eje alargado, somete a los cojinetes a un trabajo duro que, sobre todo, si están lubricados por agua o líquidos sin grandes propiedades lubricantes, hace que su vida sea corta e imprevisible. El líquido bombeado es desecho lixiviado que contiene partículas de hierro, cobalto y pequeñas cantidades de partículas de níquel lo que provoca que la misma tenga un alto grado de deterioro en su árbol debido a la fatiga y desgaste del material, provocando así la ruptura del mismo.

1.8. Afectaciones más comunes en este tipo de bomba.

La afectación más común en este tipo de bomba es en su eje de transmisión o árbol ya que al estar sumergido en este líquido este está expuesto a la fatiga y desgaste del material del cual está confeccionado provocando la ruptura de dicho árbol. Estas afectaciones en el árbol provocan el paro para la máquina, teniendo como consecuencias grandes pérdidas en la industria.

1.9. Características del árbol de la bomba.

El árbol analizado entra dentro de la categoría de los escalonados, el mismo pertenece a la bomba centrífuga de posición vertical hacoc, está fabricado de un acero AISI 1034 utilizado en la industria de la ingeniería automotriz, para la fabricación de diferentes piezas, este árbol tiene una geometría donde su longitud es de 1090mm, con un diámetro para los cojinetes de 60 mm y para el impelente de 50 mm, ubicado en esta última zona un chavetero de 70 mm largo y un radio de 7 mm, además tiene un peso de 20,8 Kg y es una pieza fundamental de esta bomba.

1.9.1. Características de los árboles y ejes.

Según lo planteado por Reshetov, (1985), el esfuerzo principal que actúa sobre el eje de una máquina centrífuga es el originado por el momento torsor aplicado en la sección más débil del mismo. Un criterio a tener en cuenta en los ejes de las máquinas centrífugas, es el de la velocidad crítica que es aquella para la cual el eje comienza a vibrar con amplitudes inadmisibles, al coincidir la frecuencia de rotación con la frecuencia natural del eje, por lo que, al diseñarlos, se recomienda que la primera velocidad crítica sea por lo menos un 20 % mayor que su velocidad de rotación en condiciones normales de operación. Otro criterio a tener en cuenta en los ejes de las máquinas centrífugas, está basado en el valor de deflexión o flecha estática producida por su propio peso y el del impelente, cuyo valor máximo es de 0.130 a 0.150.

Se conocen como árboles a los elementos giratorios encargados de transmitir potencia, estando por ello sometidos, a veces, a esfuerzos de torsión pura y casi siempre a esfuerzos combinados de torsión y flexión. Por la forma del eje geométrico del árbol se

clasifican en 3 tipos de árboles, (a) arboles rectos de sección circular constante: el árbol o eje está formado por un único diámetro, (b) arboles Escalonado: la sección del árbol es variable compuesta por diferentes diámetros y (c) arboles acodados (cigüeñales): Formado por codos con apoyos intermedios. González, (2007), como se muestra en la figura 1.2.



Figura 1.2. Clasificación de los arboles según su forma geométrica

1.10. Causas que provocan la falla de la pieza.

Este árbol es una de las piezas fundamentales de la bomba centrífuga la cual se encuentra sumergida en líquido (desechos lixiviados) y las causas que provocan sus fallas son la fatiga y desgaste del material.

1.10.1. Incidencia del desgaste y fatiga del material en el árbol de la bomba centrífuga hacoc.

La fatiga y desgaste en el material en el árbol de la bomba hacoc es de gran incidencia ya que estos factores provocan cambios en el árbol teniendo como consecuencia su ruptura y el paro de la máquina donde se encuentra ubicada esta pieza, a continuación, se exponen las características de la fatiga y desgaste del material.

Fatiga de los materiales

La fatiga del material es un fenómeno producido por cargas cíclicas y choques repentinos que actúan sobre las piezas en los regímenes de trabajo a que están sometidas. A consecuencia de la fatiga en el metal se forman micro grietas comenzando a fragmentarse, lo que puede provocar una avería por la rotura de piezas. En ciencia de materiales, la fatiga de materiales se refiere a un fenómeno por el esfuerzo.

Desgaste del material

El desgaste de un material en un componente mecánico, puede variar de muy intenso a despreciable. Esto puede significar una notable pérdida de eficiencia y la inutilidad completa de la misma. Por eso es muy importante dejar establecida la necesidad de emplear la máxima rugosidad en el análisis y diagnósticos de los mecanismos de desgaste, Verdeja, (1996). En ciencia de materiales, el desgaste es la erosión de material sufrida por una superficie sólida por acción de otra superficie. Está relacionado con las interacciones entre superficies y más específicamente con la eliminación de material de una superficie como resultado de una acción mecánica.

1.11. Determinación la ruptura del árbol con la utilización de herramienta computacional como el SolidWorks.

La ruptura de las diferentes piezas se puede determinar mediante diferentes herramientas computacional de diseño, como es el caso del ANSI, SolidWorks. Para determinar la ruptura del árbol analizado se utilizó la herramienta computacional SolidWorks, el mismo es un programa de diseño mecánico en 3D que utiliza un entorno gráfico basado en Microsoft Windows, intuitivo y fácil de manejar. Su filosofía de trabajo permite plasmar sus ideas de forma rápida sin necesidad de realizar operaciones complejas y lentas. Las principales características que hace de SolidWorks una herramienta versátil y precisa es su capacidad de ser asociativo, variaciones y paramétrico de forma bidireccional con todas sus aplicaciones.

Además, utiliza el Gestor de diseño (*Feature Manager*) que facilita enormemente la modificación rápida de operaciones tridimensionales y de croquis de operación sin tener que rehacer los diseños ya plasmados en el resto de sus documentos asociados. Junto con las herramientas de diseño de Pieza, Ensamblajes y Dibujo, SolidWorks incluye Herramientas de Productividad, de Gestión de Proyectos, de Presentación y de Análisis y Simulación que lo hacen uno de los estándares de diseño mecánico más competitivo del mercado. Esta herramienta brinda la posibilidad de generar el árbol de la bomba hacoc de

aspecto casi real, comprobar su comportamiento, bajo diversas condiciones de trabajo y estudiar el movimiento conjunto de grupos de sólidos.

Lo que permite mejor conocimiento del producto antes de que exista físicamente, siendo posible detectar muchos de los problemas que de otro modo se hubieran detectado en el servicio real. Este método, consiste en la transformación de un sistema de ingeniería con infinitas incógnitas a un modelo de elementos finitos.

1.12. Conclusiones del capítulo I.

- ❖ Se desarrolló un estudio bibliográfico donde se mostró los fundamentos teóricos de diseño del árbol de la bomba centrífuga de posición vertical modelo $\pi\text{PB}\pi$ 63 de la empresa “Ernesto che Guevara”.
- ❖ Se analizaron las causas que provocaron la rotura del árbol, donde se muestra que esta máquina al trabajar altas temperatura los principales factores que la inducen son, la fatiga y el desgaste del material.
- ❖ Se mostraron las características del árbol y las características de la maquina a la cual pertenece, para dar un mejor entendimiento de lo que se quiere lograr con el presente trabajo de diploma.



Capítulo 2



Capítulo II. Materiales y métodos

2.1. Introducción.

Para el desarrollo de todo tipo de investigación se necesitan herramientas para obtener buenos resultados. La selección correcta de los materiales y métodos empleados validan los resultados obtenidos, y es por eso que resulta indispensable el desarrollo de métodos adecuados de evaluación. En el presente capítulo se abordan los cálculos correspondientes a la comprobación del diseño del árbol y de los cojinetes de la Bomba Hacoc de la UBP Recuperación de amoniaco de la Empresa del níquel Ernesto Che Guevara. Así como otros temas que serán de gran importancia durante el desarrollo del mismo.

Se define como **Objetivo** de este capítulo:

Establecer las metodologías de cálculo para comprobar el diseño mecánico del árbol y de los cojinetes de la bomba centrífuga de posición vertical Hacoc de la UBP Recuperación de amoniaco.

2.2. Mediciones desarrolladas

Durante esta investigación se realizaron diferentes mediciones para saber las dimensiones del árbol de la bomba para su diseño, donde se utilizaron una serie de instrumentos de medición, donde se tuvo en cuenta algunos factores como la longitud del árbol y el diámetro del mismo, ya que el árbol es escalonado se obtuvieron diferentes diámetros como muestra la tabla 2.1.

L- longitud del árbol

d-diámetro del árbol

Tabla 2.1. mediciones realizadas en el árbol.

Magnitud	U/M	Mediciones						
L	mm	1090	1090	1090	1090	1090	1090	1090
d	mm	40	50	60	60	60	52	50

En esta tabla se mostró la geometría del árbol de que tiene una longitud de 1090 mm y que como es un árbol escalonado cuenta con diferentes diámetros.

2.2.1- Herramientas de medición utilizadas en la investigación

Para realizar el diseño de cualquier pieza es necesario conocer las características geométricas de la misma, y las características de los instrumentos que se van a utilizar para realizar una correcta selección de los mismos. En este trabajo de diploma se emplearon diferentes instrumentos de medición como, pie de rey, micrómetro y cinta métrica.

El pie de rey o calibrador de vernier

El pie de rey es un instrumento de precisión provisto de un nonio que permite realizar tres tipos de medidas de longitud (medida de espesores, diámetros o dimensiones externas). El pie de rey o calibrador permite realizar medidas de las dimensiones de un cuerpo tanto exteriores como interiores. Además de la escala principal, que está dividida en milímetros, tiene una escala de pequeña longitud que puede deslizarse a lo largo de la escala principal. Anexo 2.

Micrométrico o calibrador palmer

El micrómetro es un instrumento empleado para medir longitudes exteriores o interiores (dependiendo del modelo de que se trate) basado en la rotación de un tornillo, cuyo desplazamiento axial es proporcional a su desplazamiento angular. Para ello cuenta con 2 puntas que se aproximan entre sí mediante un tornillo de rosca fina, el cual tiene grabado en su contorno una escala. Anexo 3.

Cinta métrica o Flexómetro

Una cinta métrica o un flexómetro es un instrumento que se utiliza para medir grandes longitudes, consiste en una cinta flexible graduada y se puede enrollar, haciendo que el transporte sea más fácil. También se puede medir líneas y superficies curvas. Anexo 4.

2.3. Determinación metodológica del rediseño del árbol de la bomba.

Según Aneiros, (1983), los arboles generalmente se elaboran de aceros al carbono cuyo contenido varía entre 0.25 y 0.45% de carbono, el más usado es el acero de 0.45% de carbono. También se fabrican de aceros aleados al cromo (40X). El árbol analizado está fabricado de un acero AISI 1034 utilizado en la industria para la fabricación de árboles, ejes pistones y partes de estampado, su composición química se muestra en la tabla 2.2. El elemento a rediseñar es el árbol, que pertenece a la bomba Hacoc (Bomba centrífuga de posición vertical); este recibe el movimiento rotatorio, por parte del motor y es el encargado de proporcionar el movimiento de los impelentes y transformar la energía mecánica en energía cinética.

Tabla 2.2. Composición química del acero AISI 1034

C %	Cr %	Ni %	Mn %	Si %	Mo %
0,36	0,40	0,40	0,65	0,25	0,10

En esta tabla se mostró la composición química del acero AISI 1034, en la cual se ve reflejado que este material posee un alto contenido Mn (0,65 %) y muy bajo contenido de Mo ($\frac{3}{4}$ 0,10 %).

La pieza a rediseñar es el mismo árbol, pero esta vez se realizará de un acero AISI 4340 que entra en el grupo de los aceros cromo, níquel, molibdeno, por lo general los materiales de este grupo son resistente al desgaste y a la fatiga del material, el mismo es un material adecuado para la fabricación y reparación de partes y repuestos que están sometidos a muy altos esfuerzos dinámicos tales como ejes de levas, arboles de transmisión, barras de torsión, ejes, vástagos, poleas, en general es recomendado en aplicaciones de piezas de gran sección con elevadas exigencias mecánicas, el mismo posee una dureza de 320 HRC y $\sigma_t=800$ MPa. A continuación, se muestra la tabla 2.3 la composición química estándar del acero AISI 4340.

Tabla 2.3. Composición química estándar del acero AISI 4340

C %	Mn%	P%	S%	Si%	Cr%	Ni %	Mo %
0,38	0,60	≤0,035	≤0,040	0,15	0,70	1,65	0,20
0,43	0,80			0,35	0,90	2,00	0,30

En esta tabla quedo reflejada la composición química del acero AISI 4340 en la cual se puede apreciar que tiene un alto contenido de C (0,43 %), también tiene grandes cantidades de Mn (0,60 – 0,80 %) y muy bajo contenido de Si (0,15 - 0,35 %) que comparado con el acero 1034 el contenido Si del acero 4340 es mucho más elevado. Los árboles y ejes tienen distintas formas constructivas que se determinan de acuerdo con el destino de estos elementos, según sea el carácter y la longitud de las cargas aplicadas sobre ellos, para el cálculo del árbol se desarrolló la Metodología de Cálculo propuesta por, González, (2007).

2.3.1. Cálculo preliminar.

En este cálculo se tiene en cuenta el peso de los componentes en él torque aplicado, la potencia y la velocidad angular de la transmisión, y demás componentes que se verán a continuación.

2.3.2. Peso del impelente.

Este árbol, el único cuerpo que tiene agregado es el impelente y su peso (P) se calcula por la siguiente ecuación.

$$P = m_1 \cdot g ; [N] \quad (2.1)$$

Donde:

m_1 - masa del impelente, (K_g).

g - fuerza de gravedad, (m/s^2).

2.3.3. Cálculo del momento torsor aplicado.

El momento torsor (M_t) que se le aplica al árbol depende de la potencia que se produce por el motor y la velocidad angular (w) producida por el mismo, estos parámetros se determinan mediante las siguientes ecuaciones.

$$M_t = \frac{N}{w}; [\text{N.mm}] \quad (2.2)$$

$$w = \frac{n \cdot \pi}{30}; [\text{rad/s}^{-1}] \quad (2.3)$$

Donde:

N : Potencia del motor, (w).

n : Numero de revoluciones del motor; (rpm)

π : constante; 3.14

2.3.4. Cálculo del diámetro preliminar.

El diámetro preliminar (d_k) depende del torque aplicado en el árbol y de la tensión admisible a cortante, el cual se calcula de la siguiente manera.

$$d_k \geq \sqrt[3]{\frac{M_t}{0,2[\tau]}}; mm \quad (2.4)$$

Siendo:

$[\tau]$: tensión admisible a cortante; MPa

Depende del número de revoluciones del árbol, comúnmente se suele adoptar de (12 - 20 MPa).

M_t : Momento torsor que actúa sobre el árbol; N.mm.

2.3.5. Solicitaciones presentes en el árbol.

Para el cálculo de árboles y ejes, es necesario determinar todos los esfuerzos de torsión y de flexión que surgen, (las fuerzas axiales, las fuerzas tangenciales y las fuerzas radiales que surgen en el caso de transmisiones por engranajes).

2.3.5.1. Fuerza tangencial realizada por el impelente.

La fuerza tangencial (F_t) que ejerce el impelente en el árbol tiene en cuenta el par que se aplica en el árbol y el diámetro primitivo (d_2), la cual se determina por la ecuación siguiente.

$$F_t = \frac{2 \cdot M_t}{d_2}; [N] \quad (2.5)$$

2.3.5.2. fuerza axial por el impelente.

La fuerza axial (F_a) que ejerce el impelente sobre el árbol tiene en cuenta la fuerza tangencial (F_t) y el ángulo de inclinación de los alabes (β), la misma se determina por la siguiente ecuación.

$$F_a = F_t \cdot \tan\beta; [N] \quad (2.6)$$

2.3.5.3. Fuerza radial por el impelente.

La fuerza radial (F_r) que ejerce el impelente sobre el árbol también tiene en cuenta la fuerza tangencial (F_t) y además el ángulo del impelente normal (α), y se determina por la expresión siguiente.

$$F_r = F_t \cdot \tan\alpha; [N] \quad (2.7)$$

2.3.6. Cálculo aproximado o de proyecto.

Para este cálculo es necesario tener en cuenta los momentos (flexión) que actúan sobre el árbol en las secciones más peligrosas, para esto se utiliza el software XWIGAS, el cual mediante operaciones sencillas y los datos adecuados actúa, ofreciéndonos las reacciones en los apoyos (R_a) y (R_b), también obtenemos los momentos flectores y su gráfico correspondiente. Para la obtención del este esquema de cálculo se tiene en cuenta:

1. Las cargas distribuidas (en esta cuestión el impelente) se distribuyen por cargas centradas, como se muestra en la figura 2.5.
2. El árbol o eje de transmisión se analiza como una viga simplemente apoyada.



Figura 2.5. Esquema de cálculo del árbol como una viga simplemente apoyada.

En esta figura se muestra la fuerza tangencial del impelente sobre el árbol el cual se analiza como una viga simplemente apoyada.

2.3.7. Cálculo del momento equivalente.

Por la tercera teoría de resistencia se determina el momento equivalente (M_{eq}) para la combinación de esfuerzos, teniendo en cuenta momento flector determinado por el software y el momento torsor recibido por el motor eléctrico, por lo que se determina mediante la siguiente ecuación.

$$M_{eq} = \sqrt{(M_{flex})^2 + (M_t)^2}; \text{ N.mm} \quad (2.8)$$

Siendo:

M_{eq} : Momento equivalente; N.mm

M_{flex} : Momento flector máximo; N.mm

M_t : Momento torsor; N.mm

2.3.8. Calculo del diámetro para la sección más peligrosa.

Se determina el diámetro para la sección más peligrosa, dependiendo este del momento equivalente aplicado sobre el árbol y de la tensión admisible a tracción-compresión, su relación para el cálculo es la siguiente.

$$d \geq \sqrt[3]{\frac{10M_{eq}}{0,1(1-\beta^4)[\sigma_{flex}]_{III}}} \quad (2.9)$$

$$[\sigma_{flex}]_{III} = \frac{0,33 * \sigma_{res}}{3,8} \quad (2.10)$$

Donde:

d : diámetro; mm

β : relación **diámetro interior/diámetro exterior** (para árboles macizos $\beta = 0$)

$[\sigma_{flex}]$: Tensión admisible a la tracción compresión del material

$[\sigma]_{res}$: Condición de resistencia

2.4. Metodología para la selección de cojinetes.

Los cojinetes de contacto rodante son los apoyos que utilizan elementos de rodadura y que funcionan a base de rozamiento. Para la selección de los cojinetes de rodamiento se deben tener en cuenta datos fundamentales como son la magnitud y dirección de carga, carácter de dicha carga, longevidad del servicio, entre otros datos de menos importancia. Todo lo que necesitamos de esta metodología, como las tablas y coeficientes se encuentra en la metodología propuesta por, González, (2006).

2.4.1. Escoger tipo y medida de cojinete.

Para escoger estos datos es necesario tener en cuenta las cargas que actúan sobre el cojinete, como están presente cargas radiales y axiales.

2.4.1.1. Determinación de las cargas radiales.

Para calcular las cargas radiales que actúan sobre los apoyos (derecho e izquierdo), se tendrán en cuenta las reacciones en los apoyos calculadas en la metodología anterior, y se utilizarán las siguientes ecuaciones:

$$R_{r1} = \sqrt{(F_{r1x})^2 + (F_{r1y})^2}; \text{ N} \quad (2.11)$$

Donde:

F_{r1x} y F_{r1y} son reacciones de los apoyos del árbol calculado como viga simplemente apoyada.

2.4.1.2. Determinación preliminar del parámetro de carga axial (e).

Con la relación $\frac{F_a}{C_0}$ de cada cojinete se fija el valor de (e), esta relación se puede encontrar en la tabla No.4. González, (2006).

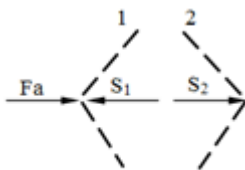
2.4.2. Determinación de las componentes axiales de las fuerzas radiales.

En los cojinetes radiales – axiales surgen componentes axiales S_1 los cuales dependen del parámetro (e), y se calcula por la siguiente ecuación:

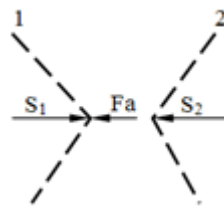
$$S_1 = e * F_r ; \text{ N} \quad (2.12)$$

2.4.3. Cálculo de la carga axial completa sobre los cojinetes.

Para este paso se tiene en cuenta la dirección de carga y el tipo de montaje en “O” (Esquema.2.2), o el montaje en “X”. (Esquema. 2.3).



Esquema 2.1



Esquema 2.2

Se toma el montaje de menor componente axial teniendo $\Sigma F_x = 0$, se llega a:

$$F_{a\Sigma I} = F_a - S_1 \quad \text{para el montaje en "O"} \quad (2.13)$$

$$F_{a\Sigma II} = F_a + S_1 \quad \text{para el montaje en "X"} \quad (2.14)$$

Según el tipo de montaje y la condición que establezca se tomarán de la tabla No. 6 los valores de las fuerzas axiales.

2.4.4. Determinación de precisión para el parámetro “e”.

Donde según la relación:

$$\frac{F_{aI}}{C_0} \text{ Se aprecia } e_I \quad (2.15)$$

$$\frac{F_{aII}}{C_0} \text{ Se aprecia } e_{II} \quad (2.16)$$

2.4.5. Cálculo de los coeficientes de carga radial “X” y axial “Y” para el cojinete más cargado.

Se considera la carga axial que influye en los cojinetes, teniendo la ecuación siguiente:

$$F_a / V * F_r \leq e \quad (2.17)$$

V – coeficiente que depende del anillo que gira, en este caso como el anillo que gira es el interior $V = 1$.

2.4.6. Determinación de la carga equivalente.

La carga equivalente se determina en dependencia de las cargas que actúan y del tipo de cojinete, para ello es necesario auxiliarse de la tabla No. 7 de la Metodología de Cálculo de apoyos propuesta por, González, (2006), según los parámetros para entrar en dicha tabla se conoce que solo actúa carga axial sobre los cojinetes por lo que la ecuación siguiente:

$$P = X * V * F_r * K_s * K_t \quad ; N \quad (2.18)$$

Donde:

X - factores de los rodamientos de bola, (tabla. No.4).

K_s - coeficiente de seguridad según las condiciones de trabajo, (tabla No.7).

K_t - coeficiente que depende de la temperatura de trabajo, (tabla No.7).

2.4.7. Cálculo de la longevidad teórica.

Esta tiene que ver con la duración de vida útil de los rodamientos, para poder calcularla se tiene la siguiente ecuación:

$$L_{10} = (C/P)^\alpha ; \text{ mil.rev} \quad (2.19)$$

C - capacidad de carga dinámica.

α - coeficiente que depende del elemento de rodadura, para los rodamientos de bolas $\alpha = 3$.

2.4.8. Determinación de la longevidad en horas de servicio.

La longevidad en horas calculada, depende de la capacidad de carga dinámica, de la carga equivalente que actúa y de la velocidad de rotación del cojinete, así como del tipo de cojinete, para determinarla se utiliza la ecuación:

$$L_{10h} = \frac{10^6}{60 \cdot n} ; \text{ horas} \quad (2.20)$$

L_{10h} - es la vida estimada en horas de funcionamiento.

n - es la velocidad de rotación del árbol, (min^{-1}).

2.4.9. Comparación de la longevidad.

Se comparan los resultados obtenidos con la longevidad requerida L_{10hc} la cual se muestra en la (tabla No.1), en dependencia de la máquina, donde sí:

$$L_{10h} \approx L_{10hc} - \text{Ok}$$

$L_{10h} < L_{10hc}$ - Pasar a una serie superior.

$L_{10h} > L_{10hc}$ - Pasar a una serie inferior o disminuir el diámetro del muñón, (si algunos de ellos es posible).

2.5. Determinación a través de la simulación.

La metodología que se va a utilizar en este caso está relacionada con el software complementario Solid Work, donde se determinarán las zonas de mayores concentraciones de tensiones bajo condiciones de carga especificada; tanto para el

impelente, como para la sección del árbol donde se ubica el mismo. Pasos a seguir para realizar la metodología del Método de Elemento Finito:

1. Elaboración del modelo geométrico en 3D de las piezas.
2. Creación de un estudio para cada caso.
3. Selección del material utilizando la biblioteca de materiales software.
4. Aplicación de las condiciones de frontera.
5. Aplicación de las cargas correspondientes para cada una de las piezas.
6. Enmallado del modelo.
7. Estudios para la obtención de los resultados.

2.5.1. Modelación del árbol.

Para la modelación del árbol se utilizó el software complementario Solid Work, en estas figuras 2.6 y 2.7 se muestra modelo geométrico del árbol, mostrando la condición de frontera y el mallado del mismo.



Figura 2.6 condiciones de frontera



Figura 2.7 mallado del árbol

La Figura. 2.6 muestra el modelo geométrico del árbol analizado. Para el mismo se tomará como geometría fija la sección donde están ubicado los cojinetes y se le aplicará un momento torsor donde se acopla el árbol al motor eléctrico y una fuerza donde actúa el impelente. Además, se muestra el mallado en la Figura. 2.7, el mallado que realiza el software en esta ocasión el más fino con el objetivo de que los cálculos sean mucho más exactos.

2.6- Conclusiones del capítulo II.

- ❖ Se estableció la metodología de cálculo para el diseño del árbol y la selección de los cojinetes de la bomba Hacoc por la metodología de cálculos correspondientes.
- ❖ Se desarrollaron las programaciones para la modelación del árbol.
- ❖ Se exponen las características del material que se implementará en el diseño del árbol que es el material AISI 4340.



Capítulo 3



Capítulo III. Análisis del resultado

3.1. Introducción.

En este capítulo se mostrarán los resultados obtenidos de expresiones matemáticas empleadas en la metodología para el diseño de la pieza. Se establece un conjunto de criterios que respaldan las teorías anteriores, lo cual garantiza la confiabilidad de los resultados obtenidos. Los datos correspondientes a cada una de las metodologías, así como los efectos que producen dichas piezas mediante los análisis de la simulación por el Método de Elemento Finito. Se hará una valoración económica con el objetivo de reducir los costos de producción y por último se concretará los daños producidos al medio ambiente por estos equipos.

Se tiene como **objetivo**: Realizar la valoración de los resultados obtenidos y a partir de ella, exponer los fundamentos científicos que dan solución al problema planteado, y un breve análisis de la valoración económica e impacto ambiental.

3.2. Resultados.

Para el cálculo del árbol, se tuvo en cuenta que el mismo se analizará como una viga simplemente apoyada, según la metodología expuesta en el epígrafe 2.3.6. A partir de las ecuaciones empleadas en el capítulo 2 para el diseño de la pieza, los resultados obtenidos se muestran en la tabla 3.1.

Tabla 3.1. tabla de los resultados obtenidos

Parámetro	Símbolo	Resultado	U/M	Ecuación
Peso del impelente	P	49,05	N	2.1
Momento torsor	Mt	49623.29	Nmm	2.2
velocidad angular	w	151,387	rad/s-1	2.3
diámetro preliminar	dk	25	mm	2.4
fuerza tangencial	Ft	396,986	N	2.5
fuerza axial	Fa	229,199	N	2.6
fuerza radial	Fr	229,199	N	2.7
momento equivalente	Meq	49623,0	Nmm	2.8
diámetro sección más peligrosa	d	50	mm	2.9
tensión admisible	σ_{flex}	69	MPa	2.10
carga radial	Rr1	81	Nmm	2.11
componente axial de la fuerza radial	S1	17	N	2.12
carga axial de los cojinetes para el montaje en o	Fa	212,19		2.13
carga axial para los cojinetes montaje en x	Fa	246,19		2.14
determinación de presión para el parámetro e1	e1	0,22		2.15
determinación de presión para el parámetro e2	e2	0,22		2.16
carga radial en x y axial en y	Fa/v*Fr	1		2.17
carga equivalente	P	81,648	N	2.18
longevidad teórica	L10	893391,0	mill.rev	2.19
longevidad en horas	L10h	12836077	horas	2.20

En esta tabla se muestran los resultados obtenidos mediante las ecuaciones planteadas en el capítulo 2 para el diseño del árbol, algunos de los principales resultados fueron el momento torso ($M_t = 49623,29 \text{ N}$), el momento equivalente ($M_{eq} = 49623,0 \text{ N}$), la longevidad teórica ($L_{10} = 893391,0 \text{ mill.rev}$) y la longevidad en horas ($L_{10h} = 12836977 \text{ hrs}$).

3.2.2. Cálculo aproximado o de proyecto.

Utilizando la herramienta de cálculo “XVigas”, y basándose en la figura 2.5 del capítulo 2, se calcularon las reacciones en los apoyos para el plano perpendiculares, tal como muestra la figura 3.1 y la figura 3.2.

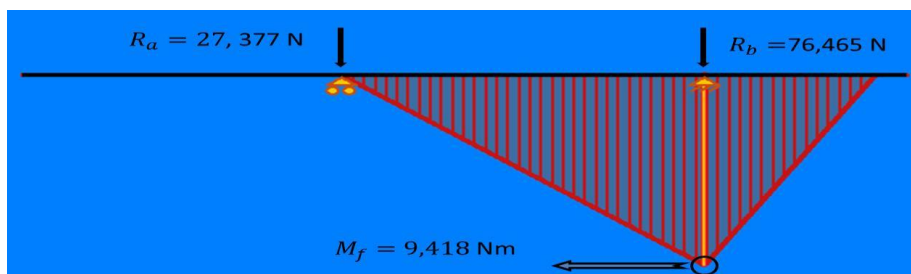


Figura 3.1 Grafico a flexión. Distribución de los apoyos y momentos flectores.

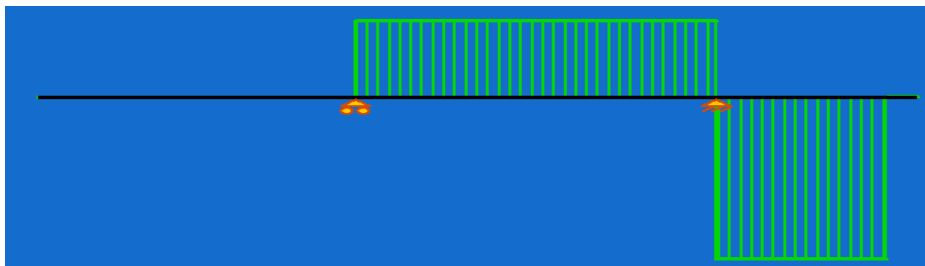


Figura 3.2 Grafico cortante calculado por el software XVigas.

En las figuras anteriores se muestra el gráfico esfuerzo flector y las fuerzas tangenciales del impelente, en la misma se muestran todos los datos calculados por el software XVigas.

3.2.3. Diámetro aproximado o de proyecto.

Teniendo en cuenta que el árbol es macizo, el cálculo del diámetro aproximado o de proyecto se realizó sustituyendo el momento equivalente y la tensión admisible a tracción compresión, redondeado por la serie Ra 40, tomada del (Dobrovolski, 1980).

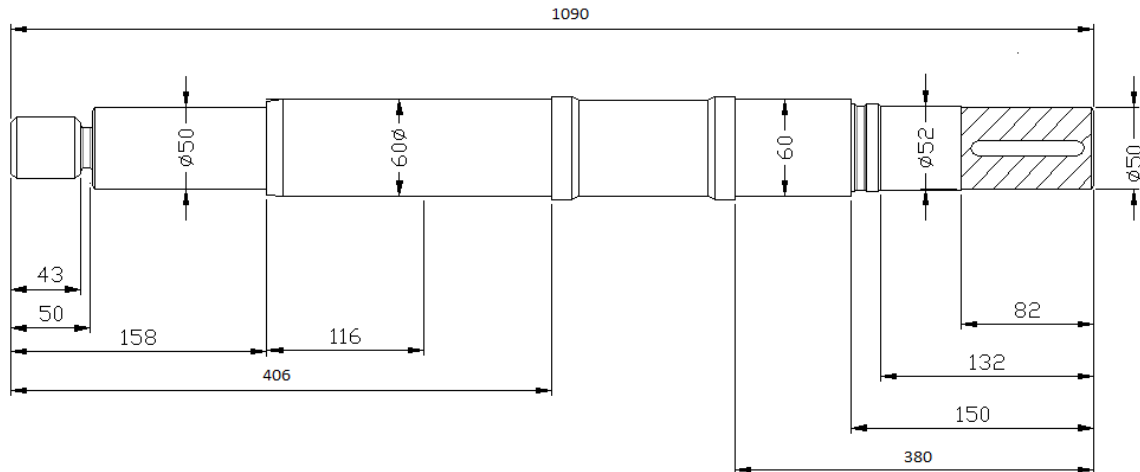


Figura 3.3 dibujo del árbol producto al cálculo aproximado o de proyecto

El cálculo del árbol se realizó por el análisis preliminar y por el análisis aproximado, teniendo en ambos como diámetro de salida de 50 mm, para el diseño del árbol se pueden escoger ambas variantes, comparando este valor con la medida real de 50 mm, se puede concluir que el mismo no presenta peligro debido a las sollicitaciones a las que va a estar sometido luego de realizar el cambio de material propuesto.

3.3. Escoger el tipo y las medidas de los cojinetes.

Para escoger el tipo de cojinete que se debe utilizar primero se debe desarrollar la metodología planteada en el epígrafe 2.4 del capítulo 2.

3.3.1. Longevidad de los cojinetes.

Luego de obtener los resultados para la selección del cojinete se dé termina la longevidad teórica y la longevidad en horas de servicio esto se determina para realizar una comparación entre ambas longevidades con el fin de determinar si los cojinetes están seleccionados correctamente.

3.3.1.1. Comparación de la longevidad.

Según la tabla No.1, como se trata de una bomba que trabaja 24 h, la longevidad teórica necesaria es de 40000 a 50000 horas de servicio, y al calcular la longevidad en horas se

puede hacer una comparación obteniendo que la calculada es mucho mayor que la teórica ($L_{10h} = 12836077 \text{ horas} > L_{10hc} = 50000 \text{ horas}$), afirmando que los cojinetes están adecuadamente seleccionados, siendo así que se podría pasar a una serie superior.

Apoyándose en la Catálogo Rodamiento FAG y conociendo que el árbol está sometido a fuerza axial, se escoge un rodamiento axial de bola tipo 51112, con diámetro interior de 60 mm, diámetro exterior 85 mm, capacidad de carga dinámica de 36500 N, y una capacidad de trabajo 93000 N, además la temperatura a la que trabajan es inferior a los 100 °C.

3.4. Modelación y simulación del árbol.

La modelación y simulación del árbol por el método de elementos finitos están a cargo del software SolidWork, donde se tienen en cuenta una serie de parámetros que se exponen a continuación. El material escogido para el árbol será el AISI 4340, con dureza de 320 HB y tensión admisible a la fluencia de 800 MPa, tomado del, Catalogo comercial, (2015). El árbol será comprobado a tracción-compresión, ya que el mismo trabajan verticalmente, sometiéndolo, producto al peso del impelente a estas solicitaciones. A continuación, se muestra una comparación de las simulaciones del árbol tanto para el acero AISI 1034, como para el AISI 4340 que es el escogido para el nuevo rediseño. Aplicando una carga de 49.05 N se muestran los efectos en las imágenes para cada material diferente, en la figura. 3.4 para el AISI 1034 y en la figura. 3.5 para el AISI 4340.

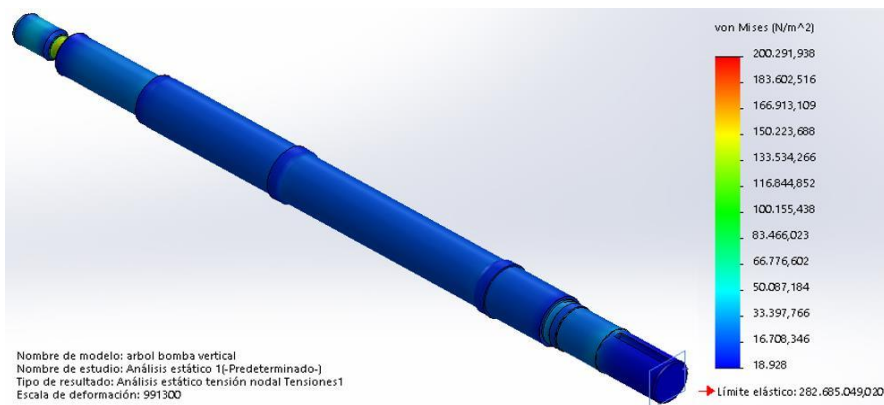


Figura 3.4. Resultado de las tensiones Von Mises del árbol para el AISI 1034.

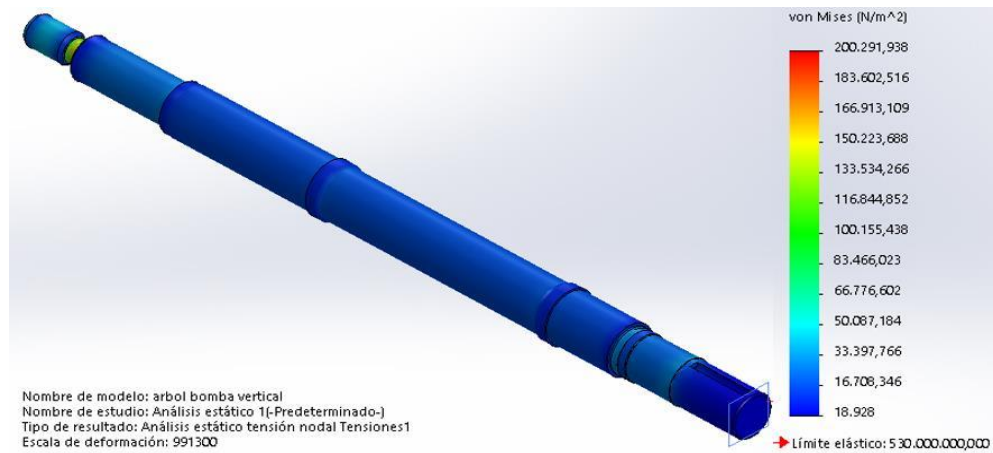


Figura 3.5. Resultado de las tensiones Von Mises del árbol para el AISI 4340.

La deformación máxima del árbol se encontrará en la parte donde se ubica el acoplamiento con el motor. En las figuras 3.6 y 3.7, se muestra el comportamiento de la deformación unitaria para el AISI 1034 y 4340.

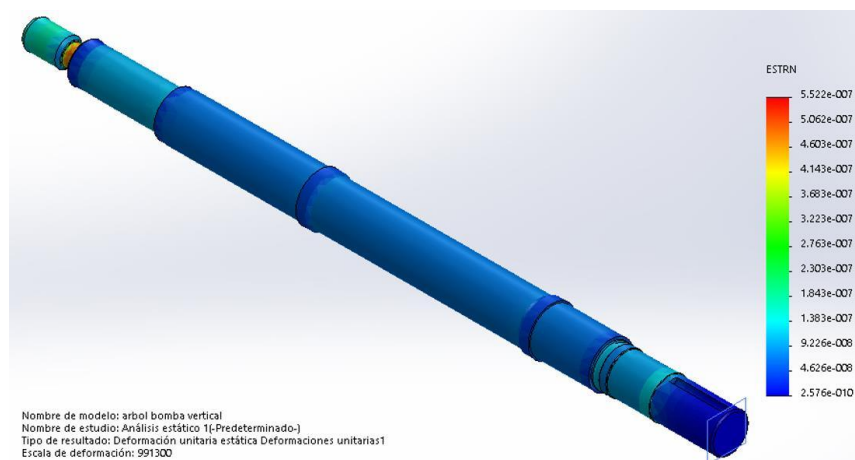


Figura 3.6. Resultado de la deformación estática del árbol para el AISI 1034.

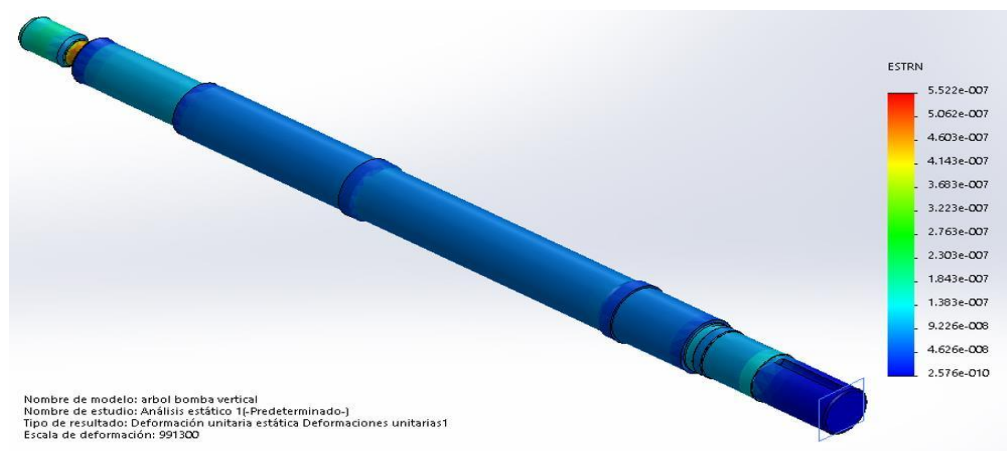


Figura 3.7. Resultado de la deformación estática del árbol para el AISI 4340.

El factor de seguridad es la relación entre los esfuerzos normales permisibles y el esfuerzo normal de diseño. Para la figura. 3.8, se tiene un factor de seguridad mínimo de 1411.37 y Máximo 1.49344e+007, mientras que para la figura. 3.9, se tiene un factor de seguridad mínimo de 2646.14 y Máximo 2.80002e+007 lo que indica que aumenta casi el doble su valor, afirmando las buenas condiciones que presenta el nuevo material.

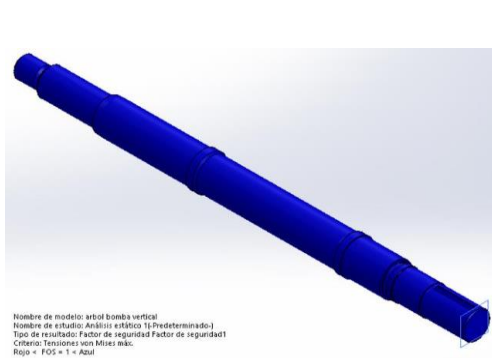


Figura 3.8. Distribución del coeficiente de seguridad sobre el árbol para el AISI 1034.

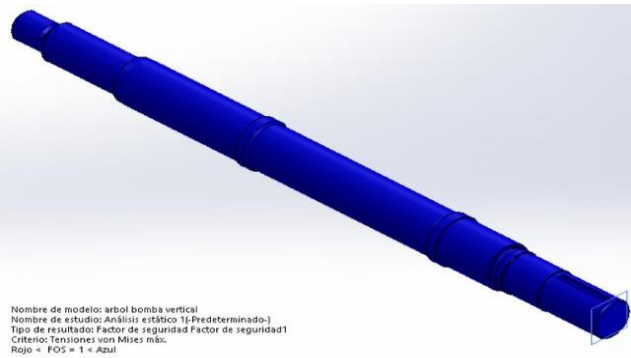


Figura 3.9. Distribución del coeficiente de seguridad sobre el árbol para el AISI 4340.

3.5. Evaluación o valoración económica.

Conocer si el precio del nuevo diseño es resulta adecuado o no es esencial para cualquier proyecto en el que se esté trabajando, ya que este ofrece una breve perspectiva de que puede ser mejor en cada caso si diseñar y fabricar una nueva pieza o importar una del exterior. Para ello se realiza un análisis y valoración económica, la cual tiene en cuenta el costo para la fabricación del árbol rediseñado. También considera el costo de los materiales utilizados, así como la mano de obra, como se muestra en la tabla 3.1.

Tabla 3.1 Valor de las piezas en el mercado nacional

Unidades	Valor unitario (USD)
Acero AISI 4340 x Kg	4,80 para un total de 99,84
Mano de obra	65
Total	164,84

Al comparar el precio de la pieza cuando se produce en el territorio con el valor de esas piezas en el mercado internacional como se muestra en tabla 3.2, se puede apreciar un ahorro considerable, que si se comprar en el exterior.

Tabla 3.2 Valor de las piezas en el mercado internacional

Unidades	Valor unitario (USD)
Árbol	315,68
Cojinetes (2) tipo 5111	246,5
Total	562,18

Los cojinetes no se construyen en Cuba por lo que deben ser importados, pero casi cualquier pieza de máquinas, puede ser diseñada y posteriormente fabricada por los ingenieros y obreros del país. En este caso, esta acción puede traer grandes ahorros monetarios, con una cifra de 411,34USD de fabricación y compra de cojinetes, se ahorra un monto de 150,84 USD.




3.6. Evaluación ambiental.

A pesar que el mundo se ha desarrollado gracias a la inteligencia del hombre la cual lo hizo capaz de inventar grandes máquinas que son movidas por motores de potencias realmente sorprendentes .no somos capaces de entender a la madre naturaleza , pues durante el proceso de extracción de minerales son empleados líquidos refrigerantes que contienen sustancias químicas los cuales al ser derramados por accidentes ,por descuido o por irresponsabilidad deja de provisto a toda esperanza de vida vegetal a ese pedazo de subsuelo, por lo que es motivo a que se exijan las medidas donde deben ser extremas.



Además, los ruidos producidos durante la puesta en Marcha de estos equipos contribuyen a aumentar la contaminación sonora, lo que a su vez daña a persona que son expuesta al ruido varias horas al día o durante largo períodos de tiempos, otros aspectos a tener en cuenta es el consumo de estas máquinas, lo cual exige una mayor extracción de combustibles fósiles y un mayor desbalance del ecosistema.

3.7. Conclusiones del capítulo III.

- ❖ Se realizó una valoración de los resultados obtenidos y a partir de ella, se expusieron los fundamentos científicos que dan solución al problema planteado y se expuso un breve análisis de la valoración económica y el impacto ambiental.
- ❖ Se calcularon los parámetros para el rediseño del árbol, obteniendo como resultado un árbol con las mismas dimensiones geométricas que el anterior, pero con mayor resistencia al desgaste, corrosión y fatiga.
- ❖ Se analizó el árbol calculado en el software Xvigas, comprobando que el nuevo material resiste todos los esfuerzos a que es sometido el mismo.



Conclusiones



Conclusiones generales

- ❖ Se desarrolló un estudio que mostro los fundamentos teóricos de diseño del árbol de la bomba centrífuga de posición vertical modelo $\pi\text{PB}\pi$ 63 de la empresa "Ernesto che Guevara".
- ❖ Se estableció la metodología de cálculo para comprobar el diseño mecánico del árbol de la bomba centrífuga de posición vertical Hacoc de la UBP Recuperación de amoniaco.
- ❖ Se Realizó una valoración de los resultados obtenidos como es el $M_{eq} = 49623,0$ Nmm, $P = 49,05$ N, la longevidad teórica de los cojinetes $L_{10} = 893391,0$ mill.rev, entre otros resultados y a partir de esta valoración, se expusieron los fundamentos científicos que dieron solución al problema planteado.



Recomendaciones



Recomendaciones

- ❖ Para el diseño de un árbol escalonado, con estos propósitos se sugiere que se utilice el acero AISI 4340 considerando las ventajas mencionadas a lo largo del trabajo.
- ❖ Realizar los controles de la calidad requeridos para la verificación sistemática de la bomba.
- ❖ Establecer sistema de protección que permita disminuir la incidencia de emanación de polvos y gases que afectan el medio ambiente.
- ❖ Evaluar mediante tratamiento térmico las posibles mejoras de las características de la microestructura del material AISI 1034.




Bibliografía

Bibliografía

- 1- Aneiros, J. M. Problemas de Diseño de Elementos de Máquinas, 1983
- 2- Alvares.T.S. ``Universidad tecnológica de Bolívar`` pag.8-10, Cartagena,2008.
- 3- Autores.c.d. Manual de Operaciones, de la planta Recuperación de amoniaco, Moa.2014.
- 4- Balcazar Cruz. F. Análisis de las variables de la cavitación en bombas centrífugas horizontales. Tesis Curricular, Instituto Politécnico Nacional Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Unidad Profesional Azcapol, 2013.
- 5- Bombeo, G. d. Open Course Ware, Universidad de Sevilla. 2016
- 6- Catalogo comercial, 'Thyssen Krupp Aceros y Servicios S.A' Pág1-3,2015
- 7- Dobrovolski, Elementos de máquina, 1980.
- 8- Fernández D, P. Bombas Centrífugas y Volumétricas, 2003.
- 9- Guliaev, A. Metalografía. Tomo I. Moscú. Editorial Mir.Pág. 53-89 32.1983.
- 10-González.R. I ``Metodología de cálculo para la selección de cojinetes``, publicación interna en el ISMM,2006.
- 11-González.R. I ``Metodología de cálculo de árboles y ejes``, publicación interna en el ISMM,2007.
- 12-Kenneth.J``Bombas selección, uso y mantenimiento``, Libro McGraw-Hill, Universidad de Santiago de Chile, pág.16-25,2016.
- 13-Machado, A. "Metodología para la selección de bombas a partir de las propiedades de los fluidos que se transportan en la industria del níquel ". Trabajo de Diploma. ISMM. Moa. 2003.
- 14-Nekrasov, B. Hidráulica. Editorial MIR. 1968.

- 15-Palomino Marín, Evelio. “Elementos de Medición y Análisis de vibraciones en Máquinas Rotatorias”, CEIM. Ciudad de la Habana, 1999.

- 16-Pérez, F. Equipos de Bombeo. Editorial Pueblo y Educación, La Habana, 1983.
- 17-Pérez, R. Cavitación y materiales de construcción en las Bombas Centrífugas. 2000.
- 18- Pérez. B. R”Procedimiento para evaluar y seleccionar bombas centrifugas”. Revista minería geología. Nos 1-2,84-88,2004.
- 19-Quezada.R.M.``Universidad tecnológica de Bolívar``pag.91-94, Cartagena,2008.
- 20- Reshetov.D. ``Elementos de Maquinas``, Editorial Pueblo y Educación,1985.
- 21-Verdeja.L.``El desgaste del material en el crisol de horno alto``. Revista de minas, Madrid, pág. 28-30, 1996.



Anexos

Anexos

Anexo 1

Bomba centrífuga de posición vertical



Anexo 2

Pie de rey



ESPECIFICACIONES

Anexo 3

Micrómetro



Anexo 4

Cinta métrica

