



# **Rediseño de componentes para prensa-estopa en generador de la PCH El Popal**

**Elver Antonio Pérez Guillen  
Libardo Quintero Gómez**

Universidad Antonio Nariño  
Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica  
Medellín, Colombia  
2020



# **Rediseño de componentes para prensa-estopa en generador de la PCH El Popal**

**Elver Antonio Pérez Guillen  
Libardo Quintero Gómez**

Proyecto de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:  
**Tecnólogo en Mantenimiento Electromecánico Industrial**

Director (a):  
DSc. Elkin Gutiérrez

Línea de Investigación:  
Diseño electromecánico

Universidad Antonio Nariño  
Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica  
Medellín, Colombia  
2020



## Resumen

Desde el diseño, uno de los principales retos es el mejoramiento de los procesos industriales que conlleven a tener sectores productivos eficientes para el desarrollo del país. En la industria colombiana el sector energético es uno de los pilares, siendo una de sus fuentes principales la energía hidroeléctrica, ya que Colombia es un país donde uno de los recursos más abundantes es el hídrico. Dentro de las centrales hidroeléctricas del país se encuentra la pequeña central hidroeléctrica (PCH) El Popal SA Esp, ubicada en Cocorná Antioquia. A partir de las inspecciones y mantenimientos periódicos se ha observado un desgaste anormal en algunos componentes de la turbina. Actualmente la PCH cuenta con un sistema complementario para el correcto funcionamiento de las unidades generadoras denominado prensa-estopa, la cual controla el posible ingreso del agua turbinada a través del eje en dirección del generador y equipos asociados; sin embargo, en los últimos meses se han presentado varias interrupciones en la operación para realizar mantenimientos correctivos debido a las fugas de agua, lo que ha implicado pérdidas en tiempo e incurrir en gastos financieros.

Por ello, en el presente trabajo se estudia y evalúa un posible rediseño de los componentes de la prensa-estopa, teniendo en cuenta las medidas y tolerancias que se tienen entre el eje y la tapa turbina para evitar el paso de agua entre turbina y cojinete sin modificar otras partes esenciales del equipo; con el fin de optimizar el proceso y disminuir los costos de mantenimiento y tiempo.

**Palabras clave:** Sector energético, energía hidráulica, pequeña central hidroeléctrica, El Popal, Prensa-Estopa.

## **Abstract**

From the design, one of the main challenges is the improvement of industrial processes that lead to having efficient productive sectors for the development of the country. In the Colombian industry, the energy sector is one of the pillars, one of its main sources being hydroelectric energy, since Colombia is a country where one of the most abundant resources is water. Among the country's hydroelectric plants is the small hydroelectric plant (PCH) El Popal SA Esp, located in Cocorná Antioquia. From periodic inspections and maintenance, abnormal wear has been observed in some components of the turbine. Currently, the PCH has a complementary system for the correct operation of the generating units called press-packing, which controls the possible entry of turbine water through the shaft in the direction of the generator and associated equipment; However, in recent months there have been several interruptions in the operation to carry out corrective maintenance due to water leaks, which has implied losses in time and incurred financial expenses.

Therefore, in the present work a possible redesign of the press-packing components is studied and evaluated, taking into account the measurements and tolerances that exist between the shaft and the turbine cover to avoid the passage of water between the turbine and the bearing without modifying other essential parts of the equipment; in order to optimize the process and reduce maintenance costs and time.

**Keywords:** Energy sector, hydraulic energy, small hydroelectric plant, El Popal, Press-packing

# Contenido

	Pág.
<b>1. Introducción .....</b>	<b>1</b>
<b>2. Objetivos.....</b>	<b>3</b>
2.1    Objetivo general .....	3
2.2    Objetivos específicos .....	3
<b>3. Justificación del estudio.....</b>	<b>4</b>
<b>4. Marco de referencia .....</b>	<b>7</b>
4.1    Marco de antecedentes .....	7
4.2    Marco teórico .....	14
4.2.1    Energía en Colombia .....	14
4.2.2    PCH El Popal.....	15
4.2.3    Central Hidroeléctrica .....	15
4.2.4    Materiales .....	24
<b>5. Metodología.....</b>	<b>26</b>
<b>6. Resultados.....</b>	<b>29</b>
6.1    Características del sello actual .....	29
6.2    Características del sello a diseñar.....	30
6.3    Requerimientos del sello a diseñar.....	31
6.4    Modelo del sello a diseñar y características .....	35
6.5    Análisis de costos.....	51
<b>7. Conclusiones y recomendaciones.....</b>	<b>54</b>
7.1    Conclusiones.....	54
7.2    Recomendaciones.....	54

**Bibliografía ..... 69**



## Lista de figuras

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Plano de la prensa-estopa suministrada por Andritz.....	9
Figura 2. Sello diseñado por Chang Chunhui, Zhai Yuemin (2012).....	13
Figura 3. Partes de una central hidroeléctrica.....	17
Figura 4. Sello Andritz empleado en turbinas hidráulicas.....	20
Figura 5. Sello de tipo radial.....	21
Figura 6. Sello de tipo radial.....	22
Figura 7. Disposición de los sellos en una turbina estática bipartida de efecto radial.....	23
Figura 8. Diseño actual Prensaestopa.....	29
Figura 9. Compatibilidad agua dulce y diferentes tipos de materiales.....	34
Figura 10. Elemento metricos del acero inoxidable.....	37
Figura 11. Elemento metricos del acero inoxidable.....	38
Figura 12. Elemento metricos de la pieza en acero inoxidable.....	38
Figura 13. Deformación de la pieza en acero inoxidable.....	39
Figura 14. Elemento metricos del algodón fenólico.....	40
Figura 15. Elemento metricos del algodón fenólico.....	41
Figura 16. Elemento metricos de la pieza en algodón fenólico.....	41
Figura 17. Deformación de la pieza en algodón fenólico.....	42
Figura 18. Elemento metricos del bronce (pisa sello).....	42
Figura 19. Elemento metricos del bronce (pisa sello).....	43
Figura 20. Elemento metricos de la pieza en bronce (pisa sello).....	44
Figura 21. Deformación de la pieza en bronce (pisa sello).....	44
Figura 22. Elemento metricos del bronce (tapa sello).....	45
Figura 19. Elemento metricos del bronce (pisa sello).....	46

---

Figura 20. Elemento metricos de la pieza en bronce (pisa sello).....	46
Figura 25. Deformación de la pieza en bronce (pisa sello) .....	47
Figura 26. Factor de seguridad pieza en algodón fenólico. ....	48
Figura 27. Factor de seguridad pieza en acero inoxidable. ....	49
Figura 28. Factor de seguridad pieza en bronce (pisa sello). ....	49
Figura 29. Factor de seguridad pieza en bronce (tapa sello).....	50
Figura 30. Diseño 3D del ajuste de la prensa-estopa para la turbina de la PCH el Popal. .....	51
Figura 31. Sello de eje tipo prensa estopa re-diseñado para la turbina de la PCH el Popal. .....	51

## Lista de tablas

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. PCHs de la empresa Lareif en Antioquia (CREGAS s.f.).....	8
Tabla 2. Materiales para el diseño de sellos de turbinas (Gallego Betancur 2006). .....	25
Tabla 3. Descripción de las acciones para el levantamiento de los requerimientos para el diseño de prensa-estopa para turbina Andritz de la central Popal. ....	27
Tabla 4. Descripción de acciones para el diseño el modelo 3D de la prensa-estopa. ....	27
Tabla 5. Propiedades de los materiales seleccionados (Goodfellow 2020a) (Goodfellow 2020b) (Comatec 2015).....	35
Tabla 6. Propiedades de los materiales seleccionados con Ansys. ....	36
Tabla 7. Calidad de la malla y los elementos para acero inoxidable. ....	37
Tabla 8. Calidad de la malla y los elementos para algodón fenólico. ....	40
Tabla 9. Calidad de la malla y los elementos para bronce (pisa sello). ....	43
Tabla 10. Calidad de la malla y los elementos para bronce (tapa sello). ....	45
Tabla 11. Deformación de las piezas del sello. ....	47
Tabla 12. Costos asociados a fabricación y montaje del sello de eje para la PCH El Popal (ver anexo B. Cotizaciones).....	52
Tabla 13. Costos asociados al mantenimiento, importación y otros gastos del sello original. ....	52



# 1. Introducción

Una de las fuentes de generación energética en Colombia consiste en las conocidas PCH's o Pequeñas Centrales Hidroeléctricas, las cuales a partir del movimiento del agua que atraviesa un grupo de turbinas obtiene energía eléctrica mediante un conjunto de equipos de transmisión y de generadores. Esas centrales hidroeléctricas son pequeñas, por lo cual la potencia instalada puede llegar hasta los 30 MW. Esta fuente de energía es muy importante, ya que permite llegar a lugares muy apartados del país, y abastecerlos de energía para labores básicas.

Una de éstas PCH's en Colombia se encuentra en Cocorná, Antioquia. En la Pequeña Central Hidroeléctrica El Popal, desafortunadamente a partir de las inspecciones y mantenimientos periódicos, se ha observado en algunos componentes de la turbina un desgaste anormal de acuerdo a las horas de operación de la máquina, especialmente en el sello del eje. En este caso la preocupación radica en el sostenimiento de la PCH el Popal, dados los antecedentes negativos que se han presentado en los últimos mantenimientos realizados por la falta de precisión que existe en el sello de una de las turbinas lo que inevitablemente ha generado el paso de sedimentos y de agua hacia otros equipos causando daños en los instrumentos del generador, la válvula de admisión y el cojinete. Todo esto ha generado un incremento significativo en el tiempo muerto y en costos debido al mantenimiento.

Esta situación problemática motiva el actual estudio, teniendo como objetivo principal rediseñar los componentes de los prensa-estopas (sellos de eje) de las turbinas Andritz en la central Popal. Esto a partir de una metodología estructurada por los siguientes momentos: levantar los requerimientos para el diseño de prensa-estopa para turbina Andritz de la central Popal, realizar el diseño conceptual de la prensa-estopa de acuerdo a las condiciones de operación, diseñar el modelo 3D de la prensa-estopa a partir de los

requerimientos y funcionalidad buscados para el sello, e implementar un piloto del diseño de la prensa-estopa en la turbina Andritz de la central Popal.

Se busca con esto que el período óptimo de trabajo de la turbina se alargue y permitir que la operación no presente tantos paros por mantenimiento, generando la potencia requerida en la central.

Sin embargo, la presente propuesta puede presentar algunas limitaciones para su ejecución debido a la situación de emergencia declarada por la pandemia y por ende baja disponibilidad de materiales para la fabricación del sello piloto, sumado a ello se tiene la carencia de disponibilidad de sellos en el mercado para la puesta en marcha de una prueba piloto que permita verificar su funcionalidad.

A pesar de esto, realizar el estudio resulta importante y decisivo para poder promover el mejoramiento de un proceso ingenieril a nivel energético, que impulse la implementación de más proyectos a corta y mediana escala que puedan ser llevados a ejecución en otros sectores y proporcionen un beneficio a todo el territorio nacional.

## **2. Objetivos**

### **2.1 Objetivo general**

Rediseñar los componentes de los prensa-estopas para la turbina Andritz en la PCH El Popal.

### **2.2 Objetivos específicos**

- Levantar los requerimientos para el diseño de prensa-estopa para la turbina Andritz de la PCH El Popal.
- Realizar el diseño conceptual de la prensa-estopa de acuerdo a las condiciones de operación.
- Elaborar un modelo 3D de un prensa-estopa a partir de los requerimientos y funcionalidad buscados para el sello.

### **3. Justificación del estudio**

“La generación de energía es un factor fundamental para el desarrollo económico de un país independiente de su tamaño, la cantidad de población o la cantidad de productos de exportación, sin embargo existe una preocupación adicional que está relacionada con la sostenibilidad de los procesos de generación de energía” (Sanchez 2016).

En este caso la preocupación radica en el sostenimiento de la PCH el Popal, dados los antecedentes negativos que se han presentado en los últimos mantenimientos realizados por la falta de precisión que existe en el sello de una de las turbinas lo que inevitablemente ha generado el paso de sedimentos y de agua hacia otros equipos causando daños en los instrumentos del generador, la válvula de admisión y el cojinete. Adicionalmente, debido a las múltiples interrupciones en la operación, por causa del mantenimiento correctivo de este sello, la PCH ha incurrido en elevados gastos económicos.

A partir de esta falla en el sello se tiene la necesidad de estudiar una propuesta de mejora en el sello de la prensa-estopa de las turbinas Andritz o un posible rediseño del mismo, con el fin de mejorar su funcionamiento y disminuir el desgaste prematuro asociados al diseño original y materiales empleados en su fabricación, para lo cual se hará a través del uso de software de diseños como son los Cad y otros análisis auxiliares, para ajustar y optimizar la propuesta y el posible rediseño, determinar espesores y materiales correctos para la aplicación. Todo esto, sin sacrificar la funcionalidad y la resistencia estructural del sello; buscando evitar el paso de agua hacia los componentes de la unidad generadora, disminuyendo costos de mantenimiento asociados a repuestos, baja durabilidad del sello, dificultades en reparación y lucro cesante por las interrupciones constantes en la operación.

El proyecto propuesto se ajusta a la necesidad identificada ya que proyecta un estudio de una propuesta para rediseñar el sello, en el cual se utilizarán materiales como el acero, el bronce y el algodón fenólico que son más adecuados que el teflón aportando una mejor



---

precisión, sobre los cuales se pueden cambiar la dimensiones para mejorar el comportamiento del sello. Esta propuesta buscará evitar la filtración de agua a los diferentes sistemas para evitar las consecuencias como daños e interrupciones en el sistema generador a través de un diseño ajustado.

La ventajas que representa alcanzar los objetivos del presente proyecto se ven reflejadas en la disminución de los recursos financieros destinados para el mantenimiento constante relacionado a problemas de reajuste del sello, la garantía de la integralidad de los demás equipos al no ser expuestos a sedimentos y la integridad de la mano de obra de la central el Popal; sino que también sería una oportunidad para el beneficio de las otras 6 PCH a cargo de la empresa LAREIF que están presentando el mismo inconveniente de desgaste en los sellos de los ejes de las turbinas, adicional a ello, la industria colombiana se vería beneficiada, dado que las piezas serán de fabricación local lo que hace que los materiales o piezas necesarias sean adquiridos en el mismo territorio y generando ingresos para otras industrias del país.



## **4. Marco de referencia**

### **4.1 Marco de antecedentes**

El territorio colombiano está geográficamente bien localizado desde el punto de vista hidrológico, esto lo hace potencialmente apto para la generación de energía hidroeléctrica en todas sus formas, como lo son las Pequeñas Centrales hidroeléctricas (PCHs); que son una de las tecnologías alternativas de producción de energía que actualmente se están implementando en el país. Estas ofrecen una buena opción para los lugares alejados de los centros urbanos y que aún no cuentan con conexión energética, debido a que se aprovechan los pequeños saltos y caudales de agua como principal fuente para la generación de energía, además por su fácil manipulación pueden ser operadas por personal local lo que se traduce en oportunidades de empleo para la región (Morales , y otros 2014).

Las pequeñas centrales hidroeléctricas tienen una baja generación de potencia, por lo que se ponen en marcha en lugares lejanos donde obtener otro tipo de energía resulta física y económicamente no viable. Las PCHs aprovechan el caudal de agua que transita por los ríos de dichas zonas que circulan a través de un conjunto de turbinas que rotan gracias al movimiento del agua, y este movimiento se transmite a unos generadores que entregan una potencia de hasta 30 MW (Mora y Hurtado 2004)

En Antioquia, departamento de Colombia existen siete PCHs a cargo de la empresa LAREIF, las cuales se encuentran ubicadas en diferentes municipios como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. PCHs de la empresa Lareif en Antioquia (CREGAS s.f.)

<b>Central</b>	<b>Municipio</b>
La Cascada	San Roque
Caruquia	Santa Rosa de Osos
Guanaquitas	Carolina del Príncipe
Barroso	Salgar
Popal	Cocorná
Los Molinos	Cocorná
San Miguel	San Luis

Cada una de estas centrales presenta problemas similares en el sistema de sellado; sin embargo, para efectos de este proyecto se centra en el problema que actualmente aqueja a la PCH el Popal.

La PCH El Popal inició su operación declarada en mayo de 2012, cuenta con dos unidades generadoras tipo Francis Horizontal de fabricante Andritz Austria, las cuales tienen una capacidad declarada ante el CNE (Comisión Nacional de Energía) de 9,5 MW (ANDRITZ 2020). Desafortunadamente a partir de las inspecciones y mantenimientos periódicos se ha observado -en algunos componentes de la turbina- un desgaste normal de acuerdo a las horas de operación de la máquina. “las turbinas son las encargadas de transformar la energía potencial, cinética y de presión del agua, en energía mecánica de rotación” (Mora y Hurtado 2004)

Actualmente la PCH cuenta con un sistema complementario y fundamental para el correcto funcionamiento de las unidades generadoras denominado “prensa-estopa” o también llamado “sello del eje”, el cual controla el posible ingreso del agua turbinada a través del eje en dirección del generador y equipos asociados (cojinetes e instrumentación y poso de válvula mariposa).

Este sello cuenta con cuatro piezas, tres de ellas diseñadas en teflón y solo una de ellas es metálica, sobre esta última, las de teflón ejercen presión para evitar las fugas de agua constante (ver Figura 1), sin embargo, en los últimos meses se han presentado varias interrupciones en la operación para realizar mantenimientos correctivos debido a que

constantemente se han estado desajustando las piezas del eje generado así fugas de agua que han afectado a los demás equipos.

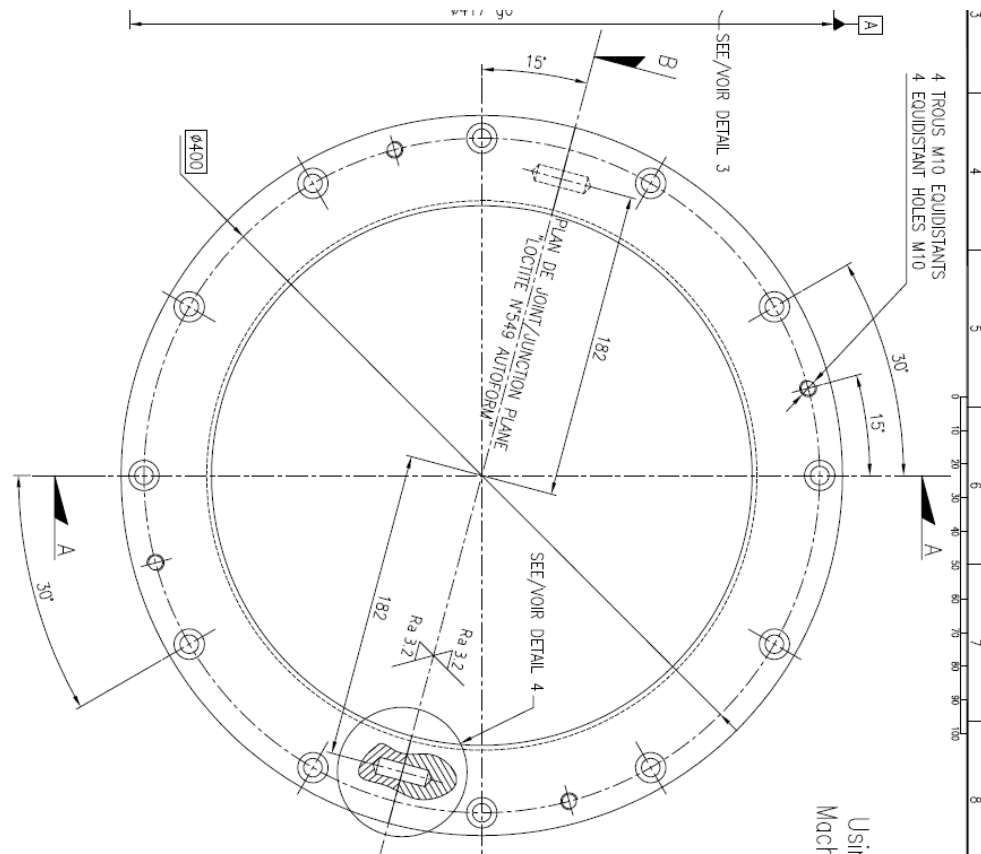


Figura 1. Plano de la prensa-estopa suministrada por Andritz.

Fuente: Manual de funcionamiento de Andritz.

A pesar de que los mantenimientos a la prensa estopa han sido realizados de acuerdo a los protocolos de ajuste que sugiere el fabricante del mismo, los resultados obtenidos no han sido los esperados toda vez que el sello se desajusta constantemente generando reprocesos en la operación de la PCH, traducidos en pérdida de tiempo y dinero para la organización. Además, como el sello es de origen extranjero, todas sus piezas y repuestos son de difícil consecución, por lo tanto, su coste es elevado y los tiempos de espera son extensos aumentando el costo en la operación de PCH.

Por lo anterior, se hace pertinente brindar una solución definitiva la cual garantice la seguridad del funcionamiento de la PCH, mediante el estudio de un modelo para rediseñar del sello haciendo uso de materiales como acero al carbón, bronce y algodón fenólico (como los más adecuados para el trabajo y esfuerzo al que es sometido), con el fin de

---

recuperar la funcionalidad del eje garantizando una operación confiable lo cual permite reducir los tiempos de mantenimiento y las pérdidas económicas asociadas a un diseño original deficiente. Se buscará una solución más económica, de fabricación local en la cual la inversión sea menor y permita el fácil acceso a los repuestos o piezas necesarias en caso de ser requeridas en un futuro.

De esta manera se hace un uso más adecuado de los recursos con que cuenta la compañía, toda vez que se reduce la inversión realizada en mantenimientos preventivos y correctivos. Dichos recursos podrían ser encaminados a la resolución de otro tipo de problemas asociados a la operación. De la misma manera se reducirían las implicaciones de seguridad para quienes trabajan en la planta, y se prolongaría la integridad de los equipos favoreciendo la estabilidad del servicio.

Adicional a ello el buen desarrollo de las Pequeñas Centrales Hidroeléctricas genera externalidades positivas para la región donde se ubica, permiten el aprovechamiento de los tejidos energéticos de la región, que para zonas no interconectadas, reemplaza de a poco la utilización de combustibles fósiles que tienen consecuencias negativas para el medio ambiente (Mora y Hurtado 2004).

En este sentido, el desarrollo de estudios para el diseño o repotenciación de sellos de ejes de turbinas hidráulicas se hace necesario e imprescindible para el desarrollo tecnológico y económico del país. Entre algunos de los estudios recopilados y con información relevante para el caso de estudio se tiene el trabajo realizado por los ingenieros mecánicos Aragón, Pérez & Quesada (2015) a través de su tesis "*Diseño de un sello mecánico para el eje de una turbina hidráulica vertical*" donde realizan el análisis del problema que presenta el sello de eje de las turbinas del Proyecto Hidroeléctrico de Toro 1, con el fin de realizar el rediseño. Dicho sello ha presentado problemas en la operación al trabajar bajo condiciones de presión de lubricación que estipula el manual del fabricante y ser esta la razón principal por lo cual se hace imprescindible realizar el rediseño con el objetivo de que la turbina funcione de manera correcta y que disminuyan los costes de mantenimiento y todo lo que ello involucra (paradas de proceso, personal a cargo, compra de materiales, etc.). La metodología que utilizan para esto se basa primero en llevar a cabo la recopilación de información sobre turbinas hidráulicas Francis y sellos mecánicos, con el fin de contar

con la base teórica sólida para abordar el problema. Seguidamente hacen una recopilación de información sobre la metodología para la determinación de fallas y deficiencias de funcionamiento en máquinas e información del desempeño del sello e inspección durante las paradas programadas de mantenimiento, para acotar el problema y orientar la posible causa de falla.

Paso a seguir, ellos realizaron el modelado de la distribución de presiones en el sello del eje, utilizando un software de elementos finitos, para poder dar un diagnóstico del comportamiento del sello del eje, teniendo en cuenta la operatividad de la turbina, y concluir cuál es el tipo falla para realizar las propuestas de solución para el nuevo diseño del sello del eje. Teniendo en cuenta todo este diagrama metodológico, partiendo de las condiciones actuales de operación, se realizaron cambios operativos de caudal y presión del agua de lubricación, con lo cual se evidenció que el desgaste localizado del sello del eje no provenía de estos cambios, ya que al realizar cambios graduales no se veía afectada la presión inferior. Sin embargo, debido los sedimentos que son transportados en el agua evidencio qué, si se varía la presión en el caudal interno, esto si genera un desgaste localizado y progresivo, debido a que, si la velocidad de flujo es alta, las partículas también tendrán una alta velocidad pudiendo restringir el flujo, lo que aumenta la presión interior en zonas específicas y debido a la abrasión que se genera, va disminuyendo indudablemente la vida útil del sello del eje. Por lo tanto, se concluye que es pertinente restringir el flujo disminuyendo el caudal, mediante el cambio a un sello tipo laberinto alternado, lo cual permite que la velocidad de flujo caiga considerablemente y de igual manera la velocidad de los sedimentos transportados.

Esta tesis es una base importante para el actual caso de estudio, ya que permite tener un panorama más claro de las posibles causas que pueden generar desgaste y mal funcionamiento del sello de eje, y brindar unas posibles soluciones a evaluar en este caso. Además de otorgar un viable derrotero metodológico para el análisis de caso.

Otro estudio importante fue el realizado por la ingeniera Suárez (2014) de la Universidad de los Andes, a través de su tesis "*Revisión y Optimización del Montaje de Pruebas para un Sistema de Generación Electro-Hidráulica a Pequeña Escala*" con el fin de generar alternativas para la obtención de energía en diferentes lugares de la ciudad universitaria. En esta tesis específicamente, se busca diseñar y hacer funcional el sello mecánico de

---

una turbina, que permita estabilizarla y que trabaje correctamente. La metodología que utilizan para esto se basa primero en realizar una revisión bibliográfica y un estudio teórico sobre hidráulica y turbinas, que permita contar con las bases conceptuales para abordar el problema. Seguidamente, se realiza un estudio del sistema en cuestión, para conocer las condiciones actuales de trabajo y la capacidad de producir la energía requerida.

Luego se caracterizaron los puntos óptimos de proceso, los aspectos críticos y las posibles causas de desestabilización de la turbina. A partir de todo lo anterior, se realiza el diseño y las pruebas de campo en los elementos que se encuentran (rodete y sello mecánico) que están influyendo en el no correcto desempeño del sistema. Esto genera unas nuevas condiciones de proceso, que son evaluadas para conocer si responden de manera óptima al funcionamiento de la turbina. Finalmente, con los resultados obtenidos en el estudio, se realizan las respectivas sugerencias y se presentan los diseños óptimos para que la generación eléctrica sea la que se espera en el Campus. En este, se encuentra que el sello mecánico óptimo era un mono resorte construido en grafito, ya que este material permite que la liberación de material sea progresiva, además hace que la fricción disminuya en gran medida, permitiendo que no haya pérdida considerable de energía. Además, este tipo de sello que cuenta con dos empaques, da la garantía de un sellado correcto, evitando la fuga de fluido en el eje, el cual es el fin último. (Suárez Vargas 2014). Con esto se concluyó que el sello mecánico definitivamente genera la estabilidad necesaria para la turbina, y aumenta la potencia mecánica en el sistema. Esta tesis presenta un nuevo tipo de sello mecánico que puede ser tenido en cuenta en el estudio actual, con el fin de evaluar si éste podría mejorar el trabajo de la turbina y generarse menos desgaste en el proceso.

En el estudio desarrollado por Pastrana, Wolfe, Turnquist, & Burnett (2001) en su trabajo titulado "*Improved steam turbine leakage control with a brush seal design*" muestra los parámetros que se deben de tener en cuenta para diseñar un sello, en este caso para una turbina de vapor, y como por ejemplo la capacidad de caída de presión del fluido es importante para que el sello no se desgaste tan fácil por la colisión con el gas y de esta manera evitar fugas a quipos o lugares adyacentes. También se menciona la importancia de contar con un laboratorio donde se pruebe el sello bajo condiciones similares a las de trabajo, con el fin de conocer el desgaste y la dinámica de rotación del sello y equipos



asociados para finalmente ser probados en planta bajo seguimiento. Este trabajo es un apoyo para el desarrollo del actual, debido a que se puede buscar alternativas dentro de la empresa para disminuir el caudal cuando este llegue al sello Andritz. Sin embargo, hay que considerar que el fluido de trabajo es agua y no vapor y que las funciones a cumplir en cada caso son diferentes.

Un ejemplo más cercano al presente trabajo se evidencia en el trabajo de Chang Chunhui, Zhai Yuemin (2012) titulado “*Novel overhaul seal structure of hydraulic turbine*” En donde diseñan una estructura a partir de 4 partes y donde el sello va presionado directamente y es totalmente sólido con el fin de evitar fugas de aire y de esta manera las 4 partes quedar integradas. Estas 4 partes son un sello, un casquillo, un perno y una goma. La factibilidad de la estructurada diseñada no cuenta con agujeros y esto permite que sea de mas facil elaboración y mejor compatación, ya que la estructura empleada de sellado con la que comparaban la patente es hueca para ser sellada con aire presurizado y de esta manera expandirse y sellar el paso de agua (ver Figura 2). Con este sello se puede ver que una pieza sólida bien diseñada puede generar un mejor acoplamiento y por ende un mejor sellado dentro de las turbinas con el fin de que el agua no se filtre a otras partes del equipo.

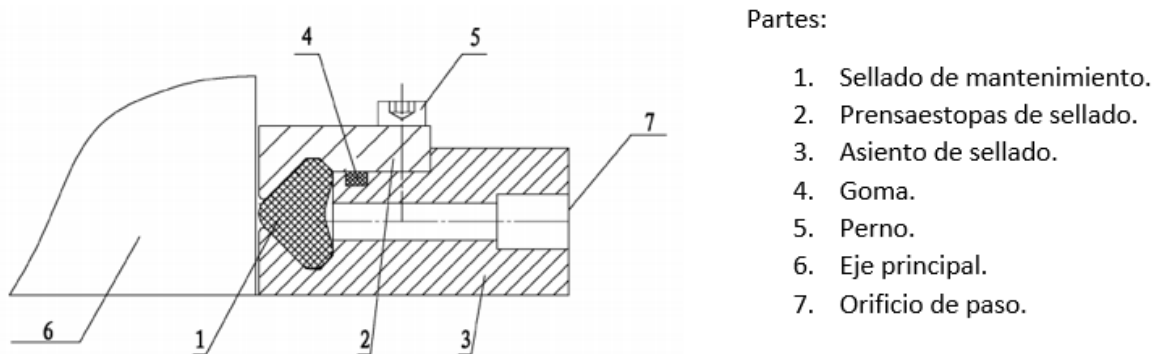


Figura 2. Sello diseñado por Chang Chunhui, Zhai Yuemin (2012).

Fuente: (Chang Chunhui 2012).

Un trabajo de mayor similitud es el presentado por Changxiang Xu (2011), en su investigación “*Gland Seals*” en donde diseñaron sellos herméticos de prensaestopas con un sello de junta tórica fabricada en elastómero y así evitar la fuga del agua, ya que con anterioridad eran diseñados con metales que, en sí, presentaban irregularidades que hacían que en su unión quedaran cavidades por donde se podía filtra el agua. Dentro de

---

esta patente se encuentra que es muy importante que el sello posea suficiente tensión para quedar completamente sellado a las otras estructuras metálicas que presentan irregularidades y que esta aumenta la calidad del sellado si lleva sujetadores o es presionada muy bien por la presión del fluido. Se observa que este tipo de diseño es el que se usa actualmente pero aún el material no proporciona una buena unión entre ellos y quedan cavidades que dejan filtrar el agua, como la problemática que actualmente tiene la PCH el Popal. Sin embargo, este trabajo muestra la importancia que tiene una buena selección de materiales para el diseño del sello de la prensa-estopa.

Con estos trabajos de referencia se puede validar la importancia del diseño aplicado a las diferentes industrias y como la selección de materiales, la dinámica de movimiento y pruebas pilotos son importantes a la hora de diseñar elementos para equipos y sobretodo objetos que están sometidos a algún tipo de presión.

## **4.2 Marco teórico**

### **4.2.1 Energía en Colombia**

Sin duda la energía siempre ha impulsado el desarrollo de los países, desde sus formas más primarias como el fuego, hasta sus más grandes avances como las actuales energías limpias. En un país como Colombia, rico en recursos naturales, contar con múltiples fuentes de energía es primero una realidad y segundo un privilegio, que debe enfocarse correctamente con el fin de lograr la producción, almacenamiento y distribución de energía para cada persona, empresa o sector del país.

Dentro de los recursos naturales más abundantes con los que cuenta el país está el recurso hídrico. Por ello desde el siglo pasado se evidenció que se tenía en el recurso hídrico un alto potencial para extraer otro recurso como la energía eléctrica, ya que la ubicación y la configuración de sus ríos se presta para el aprovechamiento hidráulico (Ingfocol Ltda 2015).

A nivel global Colombia es considerada una de las potencias en capacidad hidráulica, debido al área total comprendida en toda su riqueza hídrica (1.141.748 km<sup>2</sup>), y al gran caudal de sus ríos más importantes (52.075 m<sup>3</sup>/seg). Además se ha estimado que el potencial de hidroelectricidad corresponde a unos 93.085 MV, de los cuales hasta el

momento se tienen como capacidad instalada 7.700 MW, quedando todavía un gran tramo por trabajar (Torres Quintero 2014).

No en todo el territorio colombiano se encuentra la configuración ideal para generar energía eléctrica mediante esta fuente de energía renovable como lo es el recurso hídrico. Para esto se debe contar con la suficiente cantidad de recurso hídrico y con las condiciones topográficas óptimas, con el fin de que el caudal tenga la fuerza suficiente y la altura necesaria para que caiga con la mayor energía posible y esta sea recuperada. Una de las regiones en Colombia que se presta para obtener energía mediante hidroeléctricas en la zona andina, la cual presenta unas condiciones ideales para que el país pueda abastecerse energéticamente y estar a la vanguardia frente a las exigencias de desarrollo económico (Amaya Arias y Guzmán Jiménez 2016).

#### **4.2.2 PCH El Popal**

La PCH El Popal se encuentra en el municipio de Cocorná, Antioquia. Inició su operación declarada en mayo de 2012. Cuenta con dos unidades generadoras tipo Francis Horizontal de fabricante Andritz Austria, las cuales tienen una capacidad declarada ante el CNE (Comisión Nacional de Energía) de 9,5 MW (ANDRITZ 2020).

Hidroeléctrica El Popal es un proyecto que tiene finalidad ampliar el mercado energético en el país y llegar a los Municipios y Veredas del departamento para que también pueden hacer uso de este servicio. Además, se busca generar trabajo y aportar al PIB y al desarrollo tecnológico del país.

#### **4.2.3 Central Hidroeléctrica**

En pocas palabras, una central hidroeléctrica es un conjunto de equipos que entregan energía eléctrica teniendo como materia prima el agua que se mueve a través de grandes, medianos y/o pequeños ríos. En este proceso, el agua se devuelve a los ríos en las mismas condiciones de entrada, ya que esta no es mezclada ni contaminada, tan solo se aprovecha su energía cinética. Los componentes que la constituyen son la presa, que es encargada de contener y almacenar el agua del río; la sala de máquinas donde se encuentran otros equipos importantes para el funcionamiento y control de la central hidroeléctrica; la turbina que son los encargados de la transformación de la energía cinética del agua a energía

---

mecánica; el alternador o generador que hace la transición de energía mecánica a eléctrica y finalmente las conducciones que son llevadas a cabo por un sistema de canalizaciones.

De acuerdo a la capacidad en la entrega de energía eléctrica, las PCHs se pueden clasificar en picocentrales con potencias inferior a 1kW, microcentrales que generan entre 1kW y 100kW, minicentrales que tiene un rango de 100kW a 1.000 kW y pequeñas centrales donde oscila entre 1MW y 5MW.

Este trabajo se centra en una pequeña central hidroeléctrica o PCH, la cual debido a su capacidad de procesamiento trabaja con bajas cantidades de agua (Morales Acevedo y Saavedra Martínez 2017). Estas centrales presentan mayor ventajas que las grandes centrales hidroeléctricas, debido a que no impactan directamente al medio ambiente y su ecosistema al no tener construcciones tan grandes y afectaciones al normal movimiento del agua de los ríos (ElectroHuila 2020).

En términos generales, una central hidroeléctrica está conformado por una entrada de agua que fluye a través de una tubería que aumenta la presión del agua que ingresa, luego va a una casa de máquinas donde se encuentran las turbinas, los alternadores y el excitador. Finalmente hay una tubería que devuelve al agua turbinada al río y el trabajo producido en la casa de máquinas es transformado por un generador en energía eléctrica, para luego ser transportado por las líneas de transmisión a los diferentes lugares (ver Figura 3).

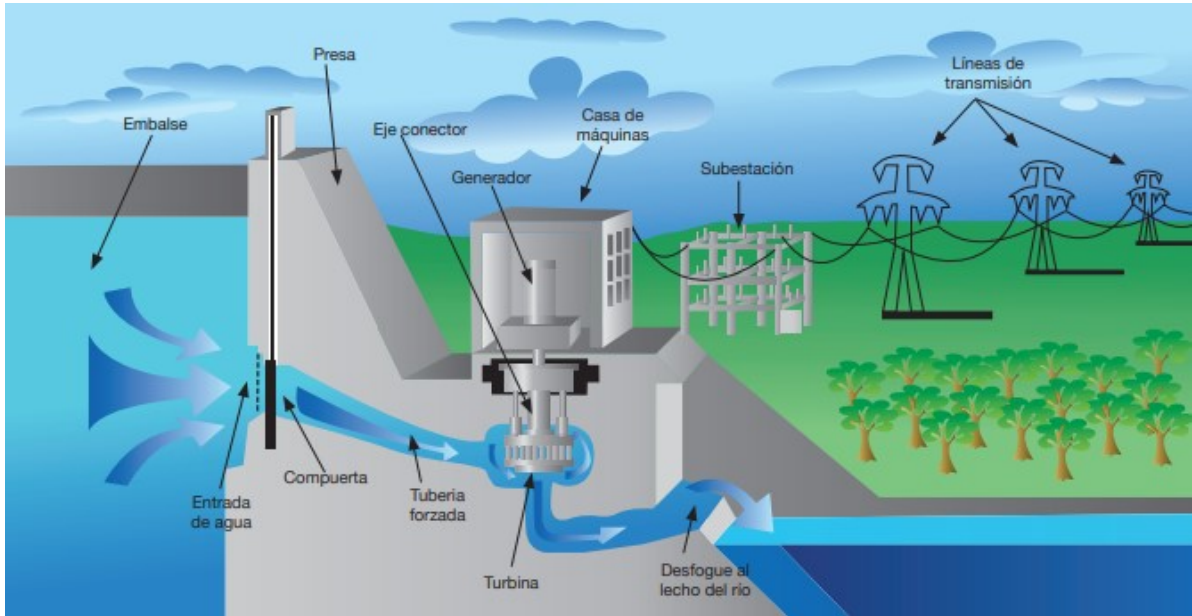


Figura 3. Partes de una central hidroeléctrica.

Fuente: Ingfocol Ltda (2015).

### 2.2.3.1 Principales Elementos de una PCH

**Obra de toma o bocatoma:** Es el conducto por donde se capta el agua del río

**Conducción:** es el canal por donde fluye el caudal de agua desde la bocatoma hasta la cámara o tanque de carga.

**Cámara o tanque de presión:** estructura que recibe el agua del canal antes de su ingreso a la tubería de presión.

**Desarenador:** es donde el material particulado que viaja en el agua se precipita.

**Compuertas:** dispositivos para controlar el flujo en las tomas, canales y cámaras de presión.

**Rejillas (mallas):** evita que los sólidos que no pudieron precipitarse sigan en el proceso.

**Tubería de presión:** tubería que transporta el agua desde la cámara de presión hasta la turbina y que permite aprovechar la energía potencial del salto.

---

**Salto:** altura vertical desde el nivel libre del agua en la cámara de presión, hasta el nivel de máximo aprovechamiento de la turbina.

**Válvula principal:** dispositivo de aislamiento de la turbina con respecto a la tubería de presión, normalmente no se usa para fines de regulación.

**Turbina:** motor hidráulico que aprovecha la energía hidráulica disponible y la convierte en energía mecánica, pueden ser del tipo:

**Pelton:** turbina de acción de flujo tangencial

**Michell-Banki:** turbina de acción de flujo transversal

**Francis:** turbina de reacción

**Kaplan:** turbina de reacción de flujo de axial

**Turgo:** Pelton de varios inyectores

**Transmisión Turbina-Generador:** sistema para transmitir la energía desde el eje de la turbina hasta el eje del generador. Puede ser por acoplamiento directo o por medio de transmisión (banda, engranajes o cadenas).

**Generador:** máquina eléctrica que convierte la energía mecánica en energía eléctrica, puede ser sincrónico o asincrónico.

Entre otros como: Tablero de control, transformador, línea de transmisión, redes de distribución (INEA 1997).

### 2.2.3.2 Turbina Francis

Es una máquina hidráulica que funciona a través de reacción y de flujo mixto. Permite trabajar con gran variedad de saltos y caudales y funcionan en alturas de filo de agua desde los dos metros hasta varios de cientos de metros.

Gracias a su diseño adaptable y flexible garantiza la obtención de gran cantidad de energía (alto rendimiento) y pérdidas hidráulicas mínimas. Aunque presentan un alto costo en su diseño, fabricación e instalación, son muy eficientes y su durabilidad en el aprovechamiento energético es de décadas.

## **Funcionamiento**

En este tipo de turbina el caudal del agua proveniente del río ingresa a un conducto en forma de espiral que transporta el agua al depósito de agua de descarga, pasando por unas paletas móviles que lo direccionan y gracias a su movimiento van controlando continuamente el flujo de agua que pasa por el rodete, y con esto la salida de energía progresiva. Las turbinas Francis se usan normalmente para cargas hidráulicas que van de 100 a 1500 ft (30.5 a 457 m) (Soriano 2019).

## **Sello de eje**

Su principal función es impedir que se fugue el agua durante su paso desde el rotor hasta la turbina. El paso del agua se da porque entre la turbina y el eje no se presenta un acople adecuado.

A pesar de no existir una única clasificación establecida para los sellos, y que en algunos diseños los límites se vuelvan borrosos, para efectos de explorar los tipos disponibles en el mercado se habla de sellos estáticos y dinámicos.

En ambos casos muchos son los requerimientos que caracterizan un buen sistema de sellado, pero se puede encontrar que las características de integridad, confiabilidad, larga vida útil, facilidad de instalación y compatibilidad con el fluido que sella y el ámbito de presiones y temperaturas operacionales, son requerimientos comunes (Aragon , Perez y José 2015).

Los sellos estáticos son aquellos donde hay poco o no hay movimiento relativo entre las caras de contacto, pero en realidad conseguir ésta última condición es realmente difícil, debido a que, por las vibraciones y el juego en las juntas, ocurren pequeños desplazamientos. Si el elemento de sellado se auto energiza, es decir, que forman un sello móvil entre superficies planas se clasifica como sello, pero si requiere de elementos externos para ello como pernos o bridas, se clasifica en empaquetaduras y esta a su vez requiere que también haya un cambio en el eje (Universidad UBA s.f.).

Quizás el esfuerzo de sellado más simple y probablemente el más antiguo es el laberinto. Las superficies de los anillos de sellado a menudo están revestidas con metal blanco y, dependiendo de la velocidad y el tamaño del eje, hay pequeños espacios entre 0.2 y 0.4 mm entre el eje giratorio y los anillos de sello estacionarios. Obviamente, no se logra un

sellado verdadero, pero para máquinas pequeñas que funcionan a bajas presiones se puede lograr una fuga aceptable. Sin embargo, los sellos de laberinto no se usan con frecuencia para estas aplicaciones.

En este hay un sistema que trabaja sobre la superficie del eje protegido por un material de sacrificio o desgaste, y un anillo laberinto, dependiendo de la cantidad de ranuras y la holgura con respecto al diámetro exterior del eje, el caudal de agua de descarga será mínimo (ver Figura 4). Este mecanismo genera pérdidas por fricción de la capa de fluido y por esta razón se trata que el largo axial no sea grande y lograr así que estas pérdidas no sean mayores. (Universidad UBA s.f.).

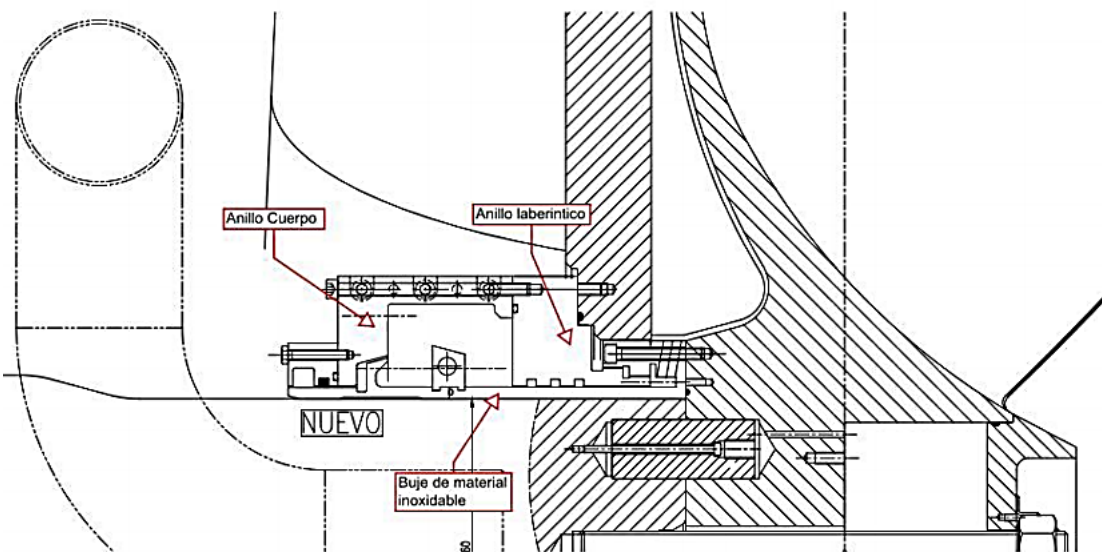


Figura 4. Sello Andritz empleado en turbinas hidráulicas.

Fuente: Universidad UBA.

Lo siguiente en simplicidad para un sello de tipo radial es una caja de relleno y todavía se usan con frecuencia. Cuando se comprime, el material de embalaje blando se expande dentro del alojamiento de la caja de relleno y cierra el espacio libre entre el eje y el alojamiento (ver Figura 5). Las tasas de fugas son generalmente bajas, sin embargo, hay dos deficiencias principales para la disposición de la caja de relleno. Primero, el limo abrasivo en el agua puede incrustarse en el material de empaque y luego rayar la superficie del eje, lo que compromete la eficiencia de sellado. En segundo lugar, es necesario



mantener una compresión adecuada del material de empaque, por lo que se requieren ajustes manuales frecuentes del seguidor de prensa-estopas durante la operación. Hoy en día, las cajas de relleno generalmente se aplican solo a turbinas pequeñas y medianas.



Figura 5. Sello de tipo radial.

Fuente: SKF 2020.

Otro sello radial de uso común es un sello de anillo de carbono. Este es un sello de eje "segmentado" con anillos de carbono compuestos por segmentos de arco individuales. Hay una variedad de diseños para este tipo de sello y el concepto general es lograr un cierto equilibrio de presión de agua entre los anillos para adquirir una baja fuga. Uno de los caminos de fuga en este tipo de sello es en las juntas de segmento. La fuga de un sello radial segmentado puede variar de menor a mayor según el tamaño del eje, el número de anillos por juego de sellos, el número de segmentos por anillo, la presión de agua sellada y la vibración. Los inconvenientes de los sellos de carbono segmentados son que tienen poca resistencia al desgaste abrasivo y el material es frágil (ver Figura 6) (Ren y Ogle 2001).



Figura 6. Sello de tipo radial.

Fuente: Alibaba 2020.

Otro sello radial es el sello de turbina estático bipartido que actúa directamente sobre el eje en pro de garantizar un aislamiento del agua turbinada y la cuba del cojinete, este sello actúa directamente sobre una camisa de sacrificio instalada alrededor del eje de forma solidaria, el material del sello de desgaste es de carbón que facilita la auto lubricación y disminuye la fricción entre materiales que están en contacto (ver Figura 7). Este sello debe ser refrigerado por agua limpia introducida a presión a través de paredes deslizantes que rodean el sello, su objetivo es formar una barrera entre el agua limpia y la turbinada en el recinto de turbina donde se encuentra alojado el rodete, la pérdida de sellado a causa del desgaste es compensado automáticamente por el desplazamiento en forma radial de los anillos (Aragon , Perez y José 2015).

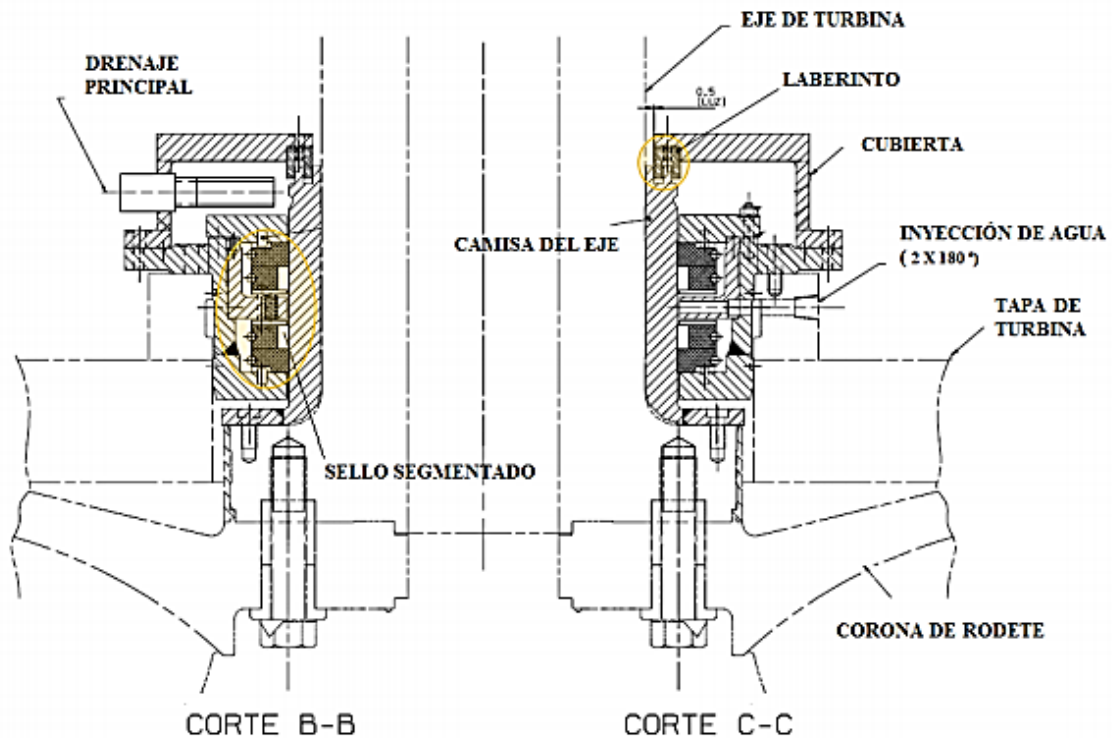


Figura 7. Disposición de los sellos en una turbina estática bipartida de efecto radial.

Fuente: Aragon, Perez, & José (2015).

El prensa-estopas tiene como función principal evitar las fugas del agua hacia otros equipos adyacentes con el fin de que no vayan a sufrir daño, además, de evitar el rozamiento mecánico sobre el eje. Las partes que lo conforman son la empaquetadura que como lo indica el nombre, impide fugas del agua; el prensa-estopa que permite el sello correcto del equipo al presionar la empaquetadura y el anillo linterna que es el que hace conexión por medio de una tubería con la carcasa (Garrido Martínez 2017).

### 2.2.3.3 Fallos comunes

La forma en que falle un sello depende tanto del diseño del mismo, las condiciones de operación y el manejo que se le dé en operación. Una herramienta valiosa para emitir un diagnóstico apropiado es el registro de mantenimiento del sello. Tampoco debe menospreciarse el procedimiento de desmontar el sello, pues en esta etapa del análisis es posible perder información por una manipulación inadecuada de los elementos.

---

En los sellos mecánicos se han identificado fallas ocasionadas por operación fuera de las condiciones de diseño y por fallos en sistemas secundarios. Para determinar correctamente las causas es importante no manipular las caras de sellado antes de hacer una inspección visual. En esta prueba se buscan daños químicos y mecánicos evidentes, agrietamiento y descoloramiento en la superficie causado por cambios térmicos, construcciones de sólidos en las superficies de la interface de sellado y a los lados de las caras y picaduras y erosión (Aragon , Perez y José 2015).

Las causas más comunes de fallas en sellos mecánicos son:

- Manipulación inadecuada de los componentes del sello.
- Ensamblaje incorrecto, lo que incluye posición errónea o precarga inadecuada.
- Diseño inadecuado.
- Problemas de operación del equipo donde se encuentra instalado el sello, como arranque incorrecto, contaminación del fluido sellador y alteraciones del sistema.
- Problemas mecánicos en el equipo con des alineamiento y vibración.

Asimismo, los modos de falla forman tres grupos principales:

- Ataque químico, como corrosión metálica e hinchazón del elastómero.
- Daño mecánico, como desgaste en una cara.
- Daño térmico, como quema de elastómeros.

#### **4.2.4 Materiales**

Una de las tareas más importantes dentro el diseño es la selección de los materiales óptimos para la fabricación de equipos e instrumentos industriales, con el fin de garantizar el correcto funcionamiento de los mismos, bajos costes de mantenimientos, y eficiencia en los procesos en los que se encuentran involucrados.

Para la selección de los materiales existen diferentes criterios que se basan no solo en el funcionamiento de los equipos, sino en el coste, en la vida útil, en las condiciones de trabajo, etc.

En el caso de sellos para turbinas hidráulicas, tanto estáticas como móviles, se ofrece un compendio de materiales en estándares rusos y su respectiva equivalencia en ANSI/SAE, como se observa en la Tabla 2.

Las designaciones de los elementos que aparecen en las tabla son:  $\sigma_0$ : punto de fluencia (*Yield point*) [MPa],  $\sigma_B$ : resistencia ultima (*Tensile ultimate strength*) [MPa], HB: dureza Brinell (*Brinell hardness*) –  $\delta$ : elongación relativa (*Relative elongation*) [%], *KCU*: (*Impact strength on U-notch specimens*) [J/cm<sup>2</sup>], *KV-10*: (*Impact energy on V-notch specimens a T=-10°C*), [J] (Gallego Betancur 2006).

Tabla 2. Materiales para el diseño de sellos de turbinas (Gallego Betancur 2006).

No	Part/ Component Description	Material	National Standard	Equivalent Standard ASTM AISI/SAE, UNS, EN	CHEMICAL COMPOSITION, %								Thickness, mm, diametr, mm	MECHANICAL PROPERTIES AT MECHANICAL PROPERTIES AT TEMPERATURE +200C					
					C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	Mo	S		P	#s:	#s	d:	KCV-10	HB
NOT MORE											MORE THEN								
1.	Runner: Crown, Blades, Band	Steel 08X13H4MII Casting	Special order	ASTM A743 CA-6NM	<0.08	<0.40	1.00-1.50	12.0-14.0	3.50-3.90	1.00-1.40	0.30-0.45	0.025	0.025		590	740	17	KV-10 40	
2.	Distributor. Guide Vanes	Steel 08X13H4MII Casting	Special order	ASTM A743 CA-6NM	<0.08	<0.40	1.00-1.50	12.0-14.0	3.50-3.90	1.00-1.40		0.025	0.025		590	740	17	KV-10 40	
	Head Cover, Bottom Ring, Operating Ring	Steel Cr3 Rolled Stock	GOST 380-88 GOST 14637-89	ASTM A 285/ A283M Grade B	0.14	0.15	0.40	<0.30	<0.30	<0.30		0.050	0.040	<20	245		26	69	
					0.22	0.30	0.65							20-40	235	370-480	25	49	
3	Movable Seals	Steel 14X17H2 Rolled stock	GOST 5632-72 GOST 7350-77	AISI SAE Grade 4141/51431	0.11-0.17	<0.80	<0.8	16.0-18.0	1.50-2.50			0.025	0.030		885	1080	10		240-250HB
	Stationary Seals	Steel 20X17H2	GOST 5632-72		0.17-0.25	<0.50	<0.80	16.0-18.0	1.50-2.50			0.025	0.035		666	813	12		270-293HB
4	Steel Cr3 Rolled stock	GOST 380-88 GOST 14637-89	ASTM A 285/ A283M Grade B		0.14	0.15	0.40	<0.30	<0.30	<0.30		0.050	0.040	<20	245		26	69	
														20-40	235	370-480	25	49	
														40-100	225		23	—	
														>100	205		23	—	

Es posible observar que para ejes móviles o estáticos el material recomendado es acero y se especifica explícitamente la composición química, espesor, las propiedades mecánicas y los estándares internacionales.

Las características importantes a considerar para definir los materiales a emplear deben de ser determinados por la temperatura, la corrosividad y la compatibilidad con el fluido de trabajo. En el caso de estudio, se suele seleccionar dos tipos de materiales diferentes para los anillos, debido a que se necesita de un material que tenga buena resistencia al desgaste como por ejemplo el Stellite, Hastelloy, carburo de tungsteno y el acero inoxidable; mientras que, para el sello secundario o interno, generalmente se fabrica con alguna resina fluocarbonada (dSPACE s.f.).

## 5. Metodología

Para el desarrollo del proyecto y el cumplimiento de cada uno de los objetivos, a continuación se describen los hitos para el estudio de la propuesta de rediseño de los componentes del prensa-estopas a partir del levantamiento de los requerimientos del diseño del mismo para la turbina Andritz de la pequeña central hidroeléctrica el Popal; con base en esto y la necesidad identificada se plantea un diseño de acuerdo a la selección de materiales, recomendaciones de fabricantes y un análisis de costos de producción, así como el ahorro comparado con el diseño original.

Se iniciará con el levantamiento de los requerimientos necesarios para el prensa-estopa y se detallarán las características del sello actual del sistema con el fin de obtener un primer diagnóstico del problema, donde se considerarán los elementos que se intervendrán como materiales del sello de la turbina Andritz, diseño, ajustes, dimensiones y análisis del historial de fallas; luego se realizará la descripción de los problemas asociados presentados hasta el momento y se relacionarán con los elementos que conforman el dispositivo.

Teniendo en cuenta la información obtenida del diagnóstico y los problemas asociados, se realizará un listado de las características deseables que debe cumplir el nuevo sello para que pueda dar solución al filtrado de agua, evite el desgaste prematuro de las piezas y permita reducir los costos del mismo y los repuestos necesarios, así como la reducción en los tiempos de espera en mantenimiento. Lo anterior con el fin de que en un futuro el sistema se pueda replicar para otras centrales, como se enuncia en la Tabla 3.

Posteriormente se diseñará un modelo 3D de la prensa-estopa, mediante previo estudio de propiedades de materiales más empleados para sellos mecánicos y las medidas que debe de tener el rediseño con el fin de no tener que hacer modificaciones auxiliares en el equipo; se realizarán bocetos iniciales del modelo en 3D y de esta manera tener las medidas y tolerancias, esto nos servirá para dar la mejor propuesta con el fin de llegar al objetivo y alcance propuesto (ver Tabla 4).

Tabla 3. Descripción de las acciones para el levantamiento de los requerimientos para el diseño de prensa-estopa para turbina Andritz de la central Popal.

<b>Acción</b>	<b>Descripción</b>
Detallar el sello actual del sistema prensa-estopa.	Se hará una descripción del sistema actual de prensa-estopa, donde se listarán los elementos, los planos del sistema actual, materiales, costos, dimensiones, entre otras variables que permitan reconocer el sistema de sello actual. Para ello se utilizarán imágenes del dispositivo, los planos con las dimensiones y una lista de características actuales, que muestren los elementos utilizados en el sistema.
Describir los problemas asociados al sistema actual.	Se listará los problemas identificados de los procesos, relacionados con los elementos que participan en el dispositivo
Definir las características y requerimientos deseados para el nuevo sello.	Con base en la problemática, se listarán las características deseadas que debe tener el nuevo sello, que cumpla con la función y tenga un valor costo eficiente competitivo, con el fin de que se puedan replicar el diseño en otras centrales.

Fuente: elaboración propia, 2019

Tabla 4. Descripción de acciones para el diseño el modelo 3D de la prensa-estopa.

<b>Acción</b>	<b>Descripción</b>
Realizar un estudio del sello de origen.	Se hará un estudio de los materiales usados en el sello actual.
Selección de materiales del sello nuevo.	Por medio de los antecedentes del sello se buscará el material para cada uno de los componentes del sello buscando así una mejor funcionabilidad del sello y de cada uno de sus componentes.
Propuesta del diseño 3D.	Se presentará un diseño donde se detallarán todas las piezas, ajustes, tolerancias y materiales los componentes del sello.

Fuente: elaboración propia, 2019

El tercer paso se hará un análisis económico de acuerdo a los costos asociados a los paros del proceso y los mantenimientos preventivos, comparado con la posible obtención del nuevo rediseño y los materiales empleados para este.





## 6. Resultados

### 6.1 Características del sello actual

El prensa-estopa es un sistema fundamental para el correcto funcionamiento de las máquinas generadoras, ya que este controla el posible ingreso de agua turbinada a través del eje en dirección del generador y equipos asociados. Este sello cuenta con cuatro piezas, 3 de ellas diseñadas en teflón y sólo una de ellas es metálica, sobre esta última, las de teflón ejercen presión para evitar las fugas de agua constante. El sello actual se puede observar en la Figura 8.

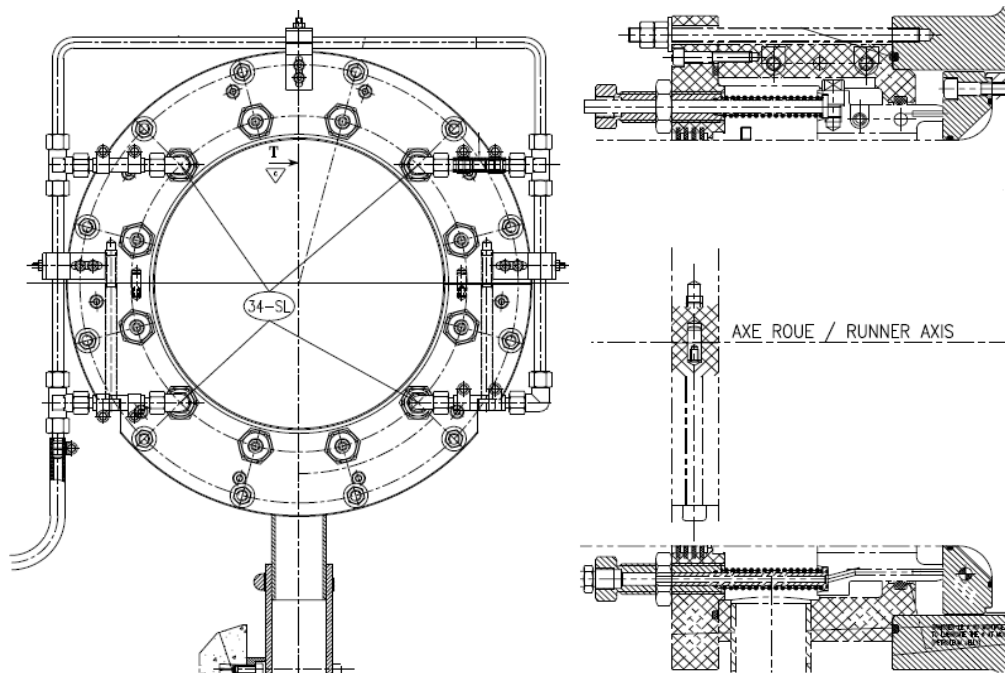


Figura 8. Diseño actual Prensaestopa.

---

En los últimos meses se han presentado varias paradas para realizar mantenimientos correctivos debido a las fugas de agua. Esta falla se da por el rápido desgaste del sello del eje, que no permite hacer el correcto sellado entre el eje y la turbina, lo que provoca directamente un aumento en la fricción entre las piezas, puesto que al no haber sellado compacto las piezas pueden “moverse” con libertad (puede ser mínimo pero el impacto es sustancial), generando problemas en la rotación del eje, fugas constantes de fluido de trabajo, el aumento de la presión y la temperatura en zonas localizadas, el paso de material particulado que viaja en el agua que puede provocar abrasión o no permitir la lubricación adecuada.

Esto sin duda genera un aumento en la periodicidad de los mantenimientos y el respectivo aumento del costo asociado a los mismo: personal capacitado, herramienta, compra de repuestos, etc. Además de impactar negativamente el proceso, debido a los constantes tiempos muertos y con esto la no generación de la energía requerida en planta.

A pesar de que los mantenimientos a la prensa estopa han sido realizados de acuerdo a los protocolos de ajuste que sugiere el fabricante del mismo, los resultados obtenidos no han sido los esperados toda vez que el sello se desajusta constantemente, generando reprocesos en la operación de la PCH, traducidos en pérdida de tiempo y dinero para la organización. Además, como el sello es de origen extranjero, todas sus piezas y repuestos son de difícil consecución, por lo tanto, su coste es elevado y los tiempos de espera son extensos aumentando el costo en la operación de PCH.

## 6.2 Características del sello a diseñar

Los parámetros que se tienen en cuenta para elegir un sello son los siguientes: (DE MÁQUINAS Y HERRAMIENTAS 2019):

*Fluido:* se hace necesario conocer el tipo de fluido, ya que estos pueden influir en la selección de los materiales con el fin de obtener la resistencia deseada dentro del equipo y no presentar incompatibilidad.

*Presión:* Debido a que se debe de contar con las condiciones de seguridad necesarias, se sugiere tener en cuenta la presión que ejerce el fluido, ya que con otros parámetros como la temperatura y las características del fluido se da la selección del material según las

propiedades con el fin de tener un funcionamiento seguro y adecuado de todos los componentes del equipo.

*Temperatura:* esta característica influye directamente en las propiedades del material como la dureza y la resistencia, entre otros. Tener en cuenta que la temperatura de operación nunca puede superar la temperatura de fusión del material.

*Características del fluido:* su importancia radica en que a partir del tipo de fluido y su viscosidad se puede determinar la vida útil de la turbina y sus componentes.

*Fiabilidad y consideración de emisiones:* es muy importante y es fijada por cada empresa con el fin de cumplir con sus estándares y política empresarial. Además, debe de cumplir con la normatividad impuesta por cada gobierno con el fin de cuidar los recursos naturales. Esto con el fin de tener la confiabilidad de que el agua de fluido no será contaminada con algún producto químico propio de los componentes.

*Consideraciones sobre el material de construcción del sello:* de este depende la seguridad de los equipos adyacentes e incluso de los mismos operadores de la máquina. Por eso es importante que tenga restricciones de temperatura de trabajo y ser resistente al fluido (resistencia química y al desgaste).

*Consideraciones sobre el material de las caras y otros componentes del sello:* es el ultimo, pero no el menos importante ya que es necesario que cumpla con buena resistencia al desgaste, poca fricción, buenas propiedades térmicas y ser resistente a la corrosión.

Tomando como base estos parámetros, se definen los requerimientos de la prensa-estopa de la turbina de la PCH El Popal, buscando una solución definitiva la cual garantice la seguridad del funcionamiento de la PCH, la disminución de tiempos muertos, el alargamiento de la vida útil y un proceso estable.

### **6.3 Requerimientos del sello a diseñar**

En el rediseño del sello, se propone evaluar la factibilidad técnica y económica de 3 materiales: acero, el bronce y el algodón fenólico que son más adecuados que el teflón, aportando una mejor precisión, sobre los cuales se pueden cambiar la dimensiones para mejorar el comportamiento del sello. Esta propuesta buscará evitar la filtración de agua a

---

los diferentes sistemas para evitar las consecuencias como daños e interrupciones en el sistema generador a través de un diseño ajustado. Estos tres materiales se usarán en el sello por sugerencia de algunos diseñadores de equipos y con expertos temas de materiales para repuestos, ya que se tienen las propiedades necesarias para soportar el trabajo ejercido en la turbina, evitando fugas y fallas.

Estos materiales propuestos para el prensa-estopa deben tener la capacidad de soportar las siguientes condiciones de la pequeña central hidroeléctrica (HMY Ingenieros 2017):

Potencia: 20 MW.

Fluido (Compatibilidad): Agua con sedimentos como arenas, tierra, basura.

Temperatura promedio Río Cocorná: 16°C-26°C.

Caudal de diseño: 13,8 m<sup>3</sup>/s.

Las características de dichos materiales son:

Acero

Las propiedades genéricas de este material son (Alacero 2020):

- Densidad media: 7850 kg/m<sup>3</sup>.
- Se puede contraer, dilatar o fundir, según la temperatura.
- Es un material muy tenaz.
- Es relativamente dúctil.
- Es maleable.
- Permite una buena mecanización en máquinas herramientas antes de recibir un tratamiento térmico.
- Se puede soldar con facilidad.

- El acero se dilata y se contrae según un coeficiente de dilatación similar al coeficiente de dilatación del hormigón, por lo que resulta muy útil su uso simultáneo en la construcción, formando un material compuesto que se denomina hormigón armado.
- El acero puede ser reciclado.

## Bronce

Una de las aleaciones más comunes que conforman los bronce, están compuestas por un 89% de cobre y un 11% de estaño.

Entre las propiedades físicas más destacadas se tienen (D'Alessandro 2020):

- Densidad de  $8,90 \text{ g/cm}^3$ .
- En cuanto a su resistividad eléctrica se mueve en un rango de 14 a  $16 \mu\Omega/\text{cm}$ .
- La resistencia a la tracción es de 900 MPa.

Una de las propiedades importantes es que su elongación es mayor al 65% y la dureza Brinell utilizada para medir la penetración de un objeto sobre el material a estudiar, es de hasta 200 – esto según la aleación. La compatibilidad entre el agua dulce y el bronce se puede observar en la Figura 9.

**Consulta de la compatibilidad de materiales y fluidos**

**Agua dulce**

Excelente **A**    Bueno **B**    Regular **C**    No Recomendable **D**    Info. no disponible **E**

**Componente metálico**

Nombre	Calificación
Acero al carbono	B
Acero inoxidable EN-1.4301 (AISI-304)	A
Acero inoxidable EN-1.4401 (AISI-316)	A
Alloy-20	A
Aluminio	A
Bronce	A
Fundición gris / Fundición nodular	A
Latón	C
Monel	A

Figura 9. Compatibilidad agua dulce y diferentes tipos de materiales.

Fuente: VYC Industrial, 2020.

#### Algodón fenólico

Material estratificado formado por capas de tela especial de algodón impregnada con resina y prensada fuertemente a altas temperaturas que permite que ambos se fusionen y se compenetren perfectamente de manera homogénea. Las propiedades que posee son (Electrocome 2020):

- Buena resistencia mecánica.
- Elasticidad interna significativa.
- Escaso desgaste por rozamiento.
- Fácil mecanización.
- Resistencia a la corrosión.
- Resistente al agua.

Las propiedades de los materiales se muestran en la Tabla 5, donde se puede verificar que cumplen con las condiciones de desgaste, resistencia y operación de trabajo a la cuál serán sometidos. Es así como a su vez se da cumplimiento con especificaciones técnicas y con la normatividad vigente; además son materiales disponibles en el mercado y que,

aunque no son los más económicos presentan una buena aplicación para el caso de estudio en cuestión y en donde más adelante se puede observar que garantizan la seguridad en la operación de la máquina y las personas que están en contacto directo, así como una buena relación costo-beneficio.

Tabla 5. Propiedades de los materiales seleccionados (Goodfellow 2020a) (Goodfellow 2020b) (Comatec 2015).

<b>Material</b>	<b>Módulo de Young (GPa)</b>	<b>Resistencia a la tracción (MPa)</b>
Bronce	80-110	300-900
Algodón fenólico	7	60-85
Acero inoxidable 316	190-210	460-860

## 6.4 Modelo del sello a diseñar y características

En el diseño de un equipo o una parte del mismo, son varias las consideraciones a tener en cuenta para realizar su modelado y su posterior diseño a escala industrial. Una de éstas consideraciones o análisis se basa en los factores de seguridad; que está relacionado con las incertidumbres que poseen los diseños y que deben de ser considerados para tener presente las fallas de los objetos o elementos durante su funcionamiento (Salazar Trujillo 2007).

Dos de las razones para el uso del factor de seguridad que en este estudio se tuvo en cuenta fueron:

*Incertidumbre en las propiedades mecánicas de los materiales:* se obtienen al realizar ensayos a los materiales y sacar hacer análisis estadísticos de sus propiedades. Hay que tener presente que las propiedades obtenidas no se hacen bajo el esfuerzo o trabajo al que serán sometidas las piezas realmente y por eso siempre se cuenta con un factor de seguridad.

*Incertidumbre en las dimensiones de los elementos estructurales:* Los equipos y mediciones en sí, presentan algunas desviaciones o errores asociadas al instrumento, por

esta razón las dimensiones de los diseños o elementos construidos no son exactamente iguales a los especificados en los planos arquitectónicos y estructurales.

La versión empleada fue Ansys Mechanical Student 2020 R1, donde se simuló con los materiales seleccionados la resistencia de cada uno de estos, incluyendo sus dimensiones con el fin de verificar que la pieza está dimensionada correctamente y con baja probabilidad de falla. El método del mallado es suavizado con elementos hexaédricos dominantes y la fuerza a la que está sometido todo el sello en conjunto es de 2.324,8 N, la cual está dada por seis muelles que aplican una fuerza de 387,3 N. Las propiedades de los materiales obtenidos con la simulación se muestran en la tabla 6.

Tabla 6. Propiedades de los materiales seleccionados con Ansys.

<b>Material</b>	<b>Módulo de Young (GPa)</b>	<b>Resistencia última a la tracción (MPa)</b>	<b>Resistencia a la tracción (MPa)</b>
Bronce	80	267	144
Algodón fenólico	1	--	62,1
Acero inoxidable 316	193	550	240

Para el acero inoxidable (prensa-estopas) se obtiene 28.053 nodos con 5.760 elementos, la calidad de este se detalla en la Figura 10 y en la Tabla 7 el tamaño mínimo de los elementos obtenidos y la calidad asociada a cada uno de ellos. Además, en la Figura 11 el mallado que presenta mejor calidad, ya que la geometría de la pieza queda definida y en la Figura 12 por el contrario, el mallado de más baja calidad y que aumenta hacia los extremos de la pieza.



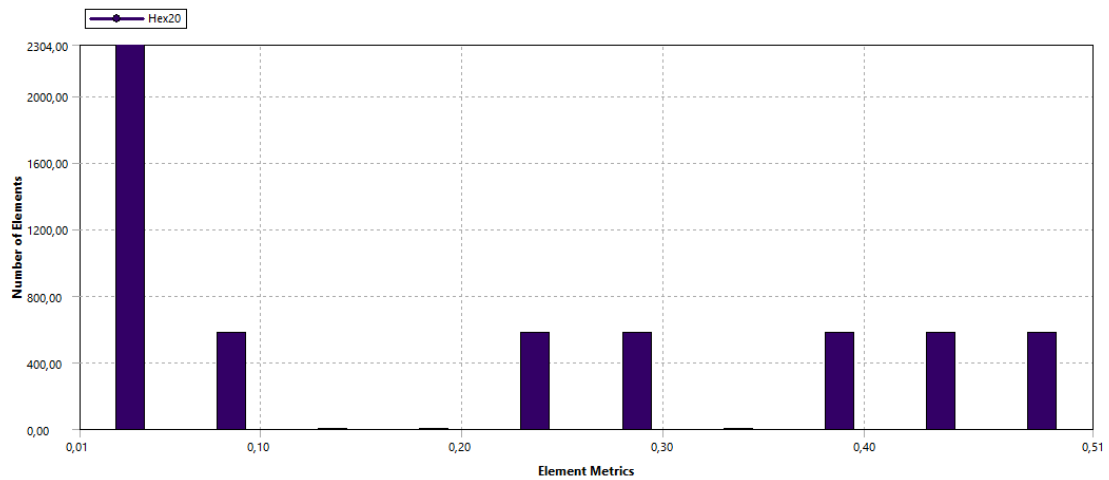


Figura 10. Elemento metricos del acero inoxidable.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 7. Calidad de la malla y los elementos para acero inoxidable.

<b>Método Hexaédricos Dominantes</b>	<b>Tamaño mínimo de elementos (mm)</b>	<b>Número de elementos</b>	<b>Calidad de la malla</b>
1	0,0355	2.300	Buena
2	0,0858	576	Buena
3	0,136	1	Buena
4	0,186	1	Regular
5	0,237	576	Regular
6	0,287	576	Regular
7	0,337	1	Regular
8	0,388	576	Regular
9	0,438	576	Baja
10	0,488	576	Baja

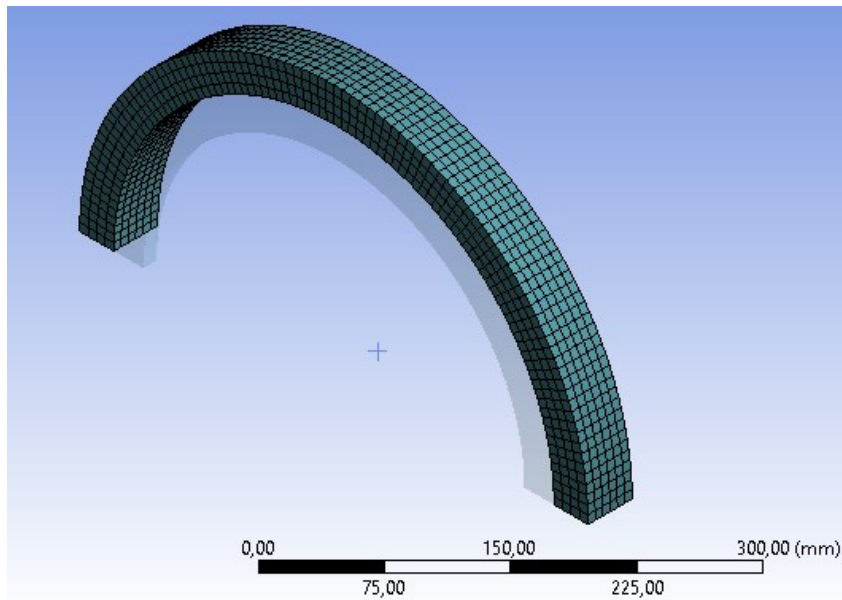


Figura 11. Elemento metricos del acero inoxidable.

Fuente: Elaboración propia.

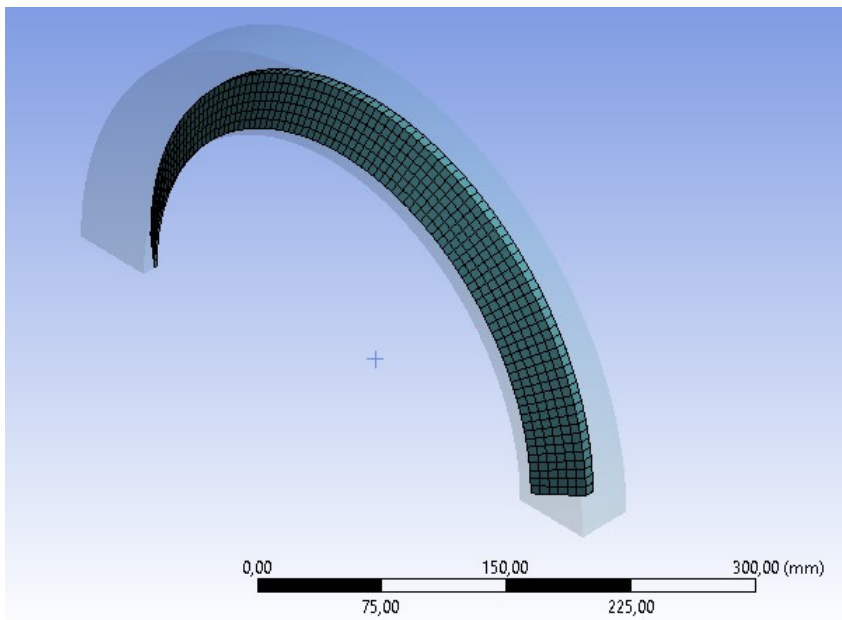


Figura 12. Elemento metricos de la pieza en acero inoxidable.

Fuente: Elaboración propia.

La deformación obtenida fue muy baja y por ende se puede decir que la pieza no fallará por corte o compresión, sino que es muy probable que se vaya desgastando poco a poco hasta que falle y según se puede ver, la deformación que mayor se puede experimentar es por la cara interna del sello (ver Figura 13).

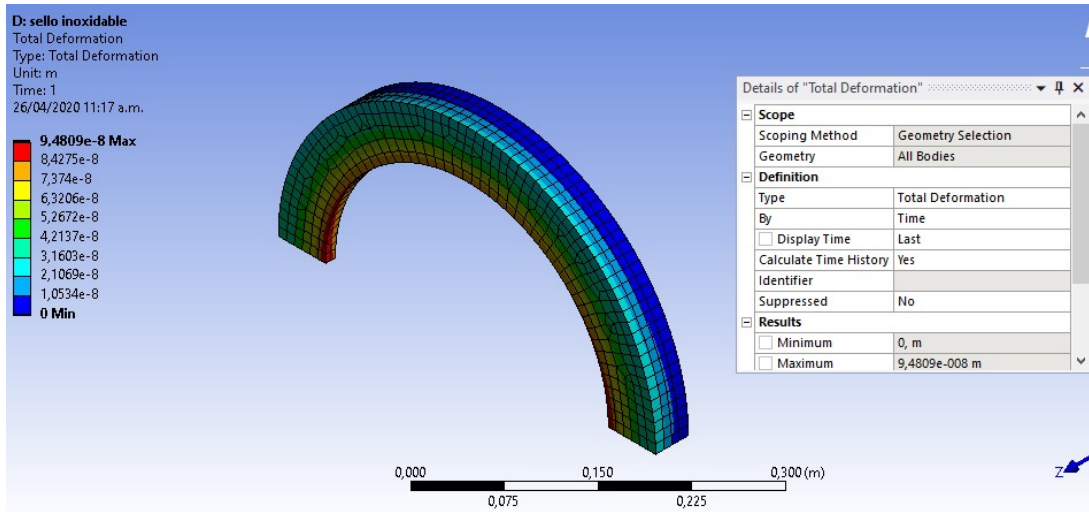


Figura 13. Deformación de la pieza en acero inoxidable.

Fuente: Elaboración propia.

En la pieza de algodón fenólico se obtiene 14.642 nodos con 2.542 elementos, la calidad de este se detalla en la Figura 14 y el tamaño mínimo de los elementos obtenidos y la calidad asociada a cada uno de ellos en la Tabla 8. En la Figura 15 y 16 se pueden observar el mallado que presenta mejor calidad y baja calidad respectivamente. En la primera hay mayor contracción de elementos con calidad buena en los diferentes componentes de la pieza. En estos puntos se visualizan los elementos completamente definidos, mientras que, la de menor calidad la mayor contracción se presenta en los bordes sin una definición clara del método aplicado.

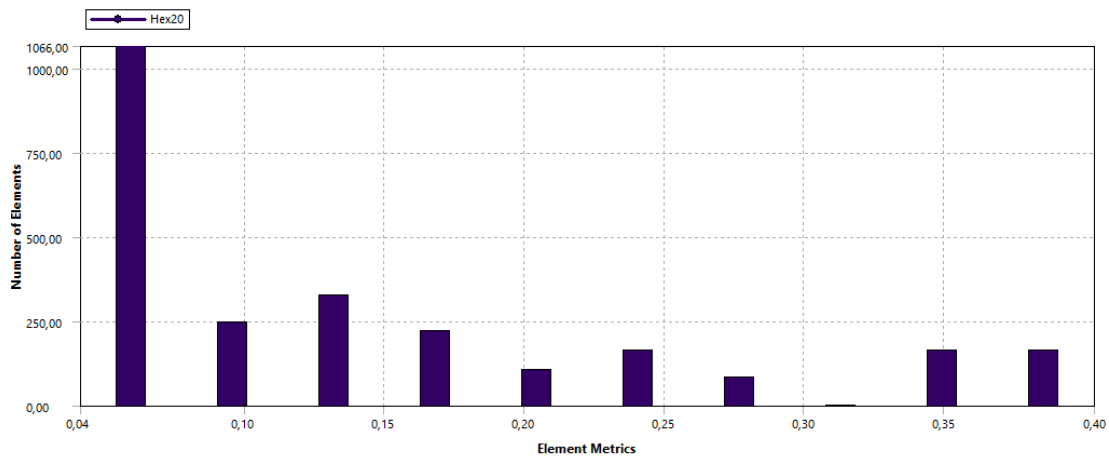


Figura 14. Elemento metricos del algodón fenólico.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 8. Calidad de la malla y los elementos para algodón fenólico.

Método Hexaédricos Dominantes	Tamaño mínimo de elementos (mm)	Número de elementos	Calidad de la malla
1	0,0594	1.070	Buena
2	0,0957	246	Buena
3	0,138	328	Buena
4	0,168	221	Regular
5	0,204	107	Regular
6	0,241	164	Regular
7	0,277	82	Regular
8	0,313	1	Regular
9	0,35	164	Baja
10	0,386	164	Baja

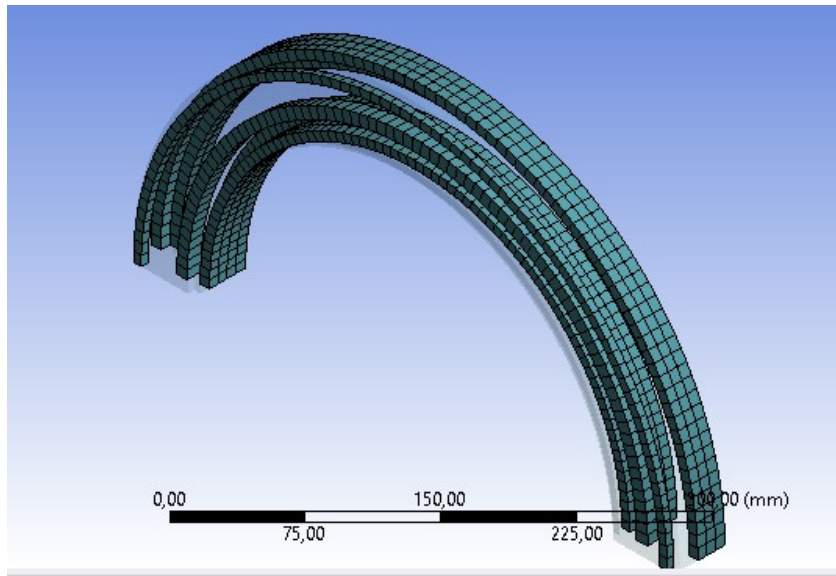


Figura 15. Elemento metricos del algodón fenólico.

Fuente: Elaboración propia.

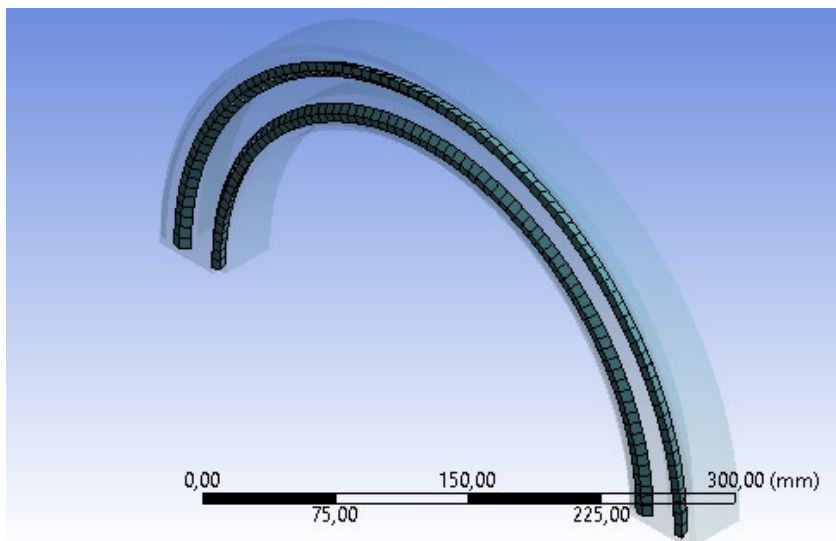


Figura 16. Elemento metricos de la pieza en algodón fenólico.

Fuente: Elaboración propia.

Similar como paso con la pieza anterior, es muy poco probable que la pieza falle por corte o compresión debido a que la deformación es muy baja y el mayor desgaste se presenta por la cara interna del sello (ver Figura 17).

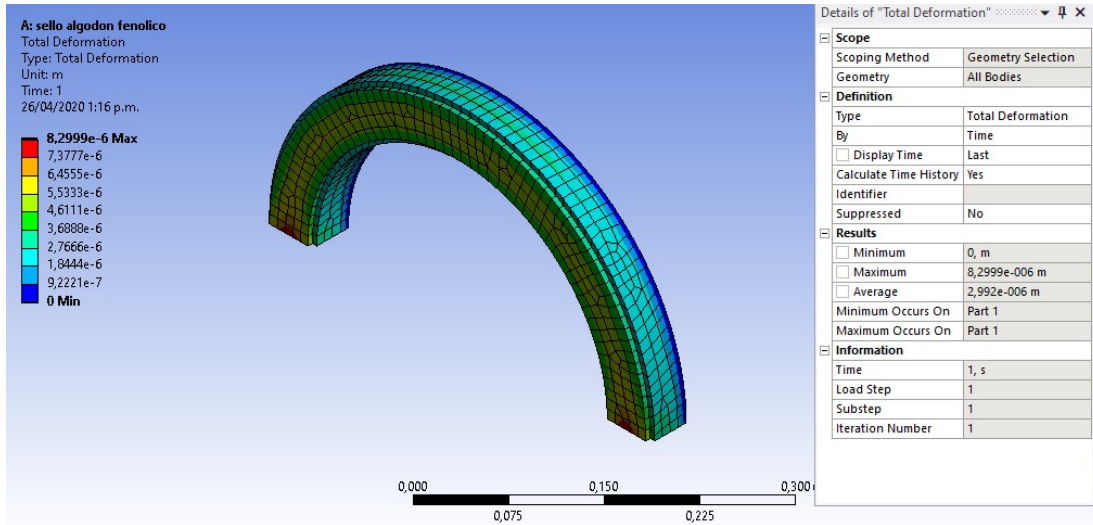


Figura 17. Deformación de la pieza en algodón fenólico.

Fuente: Elaboración propia.

En la pieza de bronce que pisa el sello se obtienen 25.580 nodos con 15.206 elementos, la calidad de este se detalla en la Figura 18 y el tamaño mínimo de los elementos obtenidos y la calidad asociada a cada uno de ellos en la Tabla 9. En la Figura 19 y 20 se pueden observar el mallado que presenta mejor calidad y baja calidad respectivamente, que están relacionados con el método aplicado y la calidad de la geometría obtenida. Para este caso el método es de elementos tetraédricos.

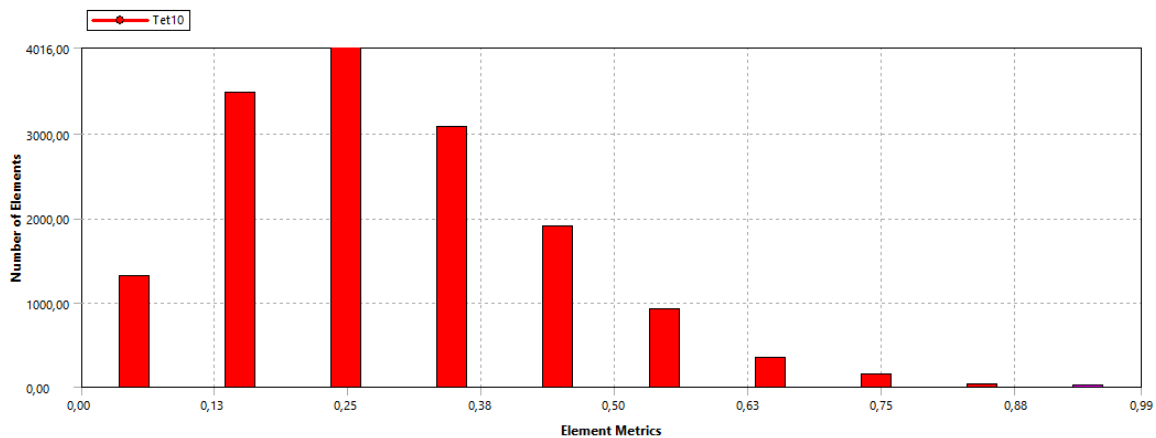


Figura 18. Elemento metricos del bronce (pisa sello).

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 9. Calidad de la malla y los elementos para bronce (pisa sello).

Método Tetraédricos	Tamaño mínimo de elementos (mm)	Número de elementos	Calidad de la malla
1	0,0503	1.300	Buena
2	0,149	3.480	Buena
3	0,249	4.020	Buena
4	0,348	3.070	Regular
5	0,447	1.890	Regular
6	0,546	921	Regular
7	0,645	340	Regular
8	0,745	145	Regular
9	0,844	20	Baja
10	0,943	16	Baja

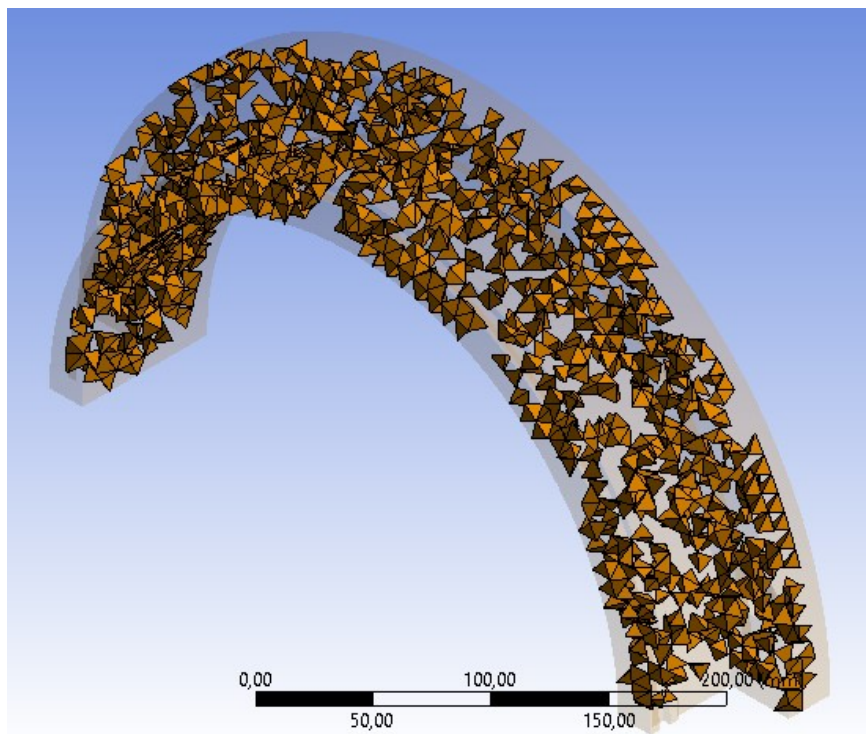


Figura 19. Elemento metricos del bronce (pisa sello).

Fuente: Elaboración propia.

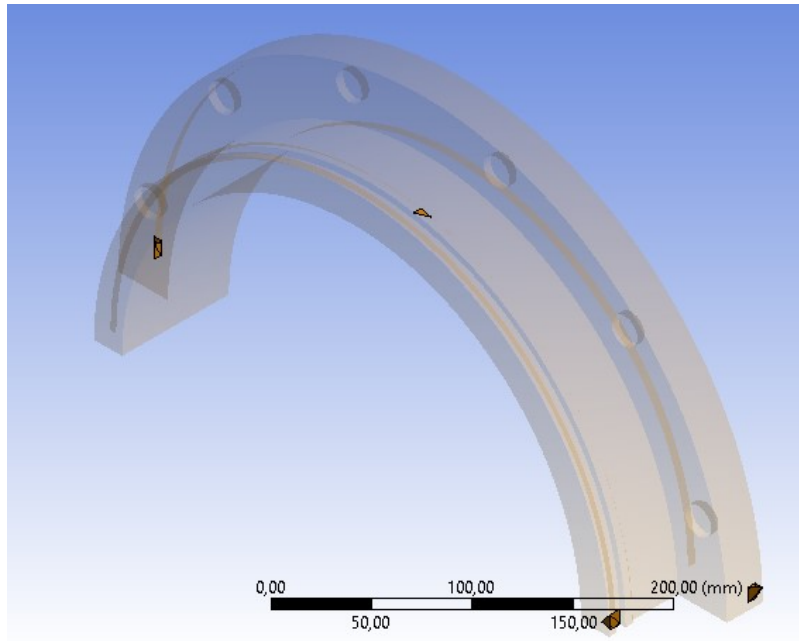


Figura 20. Elemento métrico de la pieza en bronce (pisa sello).

Fuente: Elaboración propia.

La deformación obtenida con el simulador es baja y cerca a los agujeros es donde se presenta la mayor probabilidad de que se desgaste la pieza (ver Figura 21).

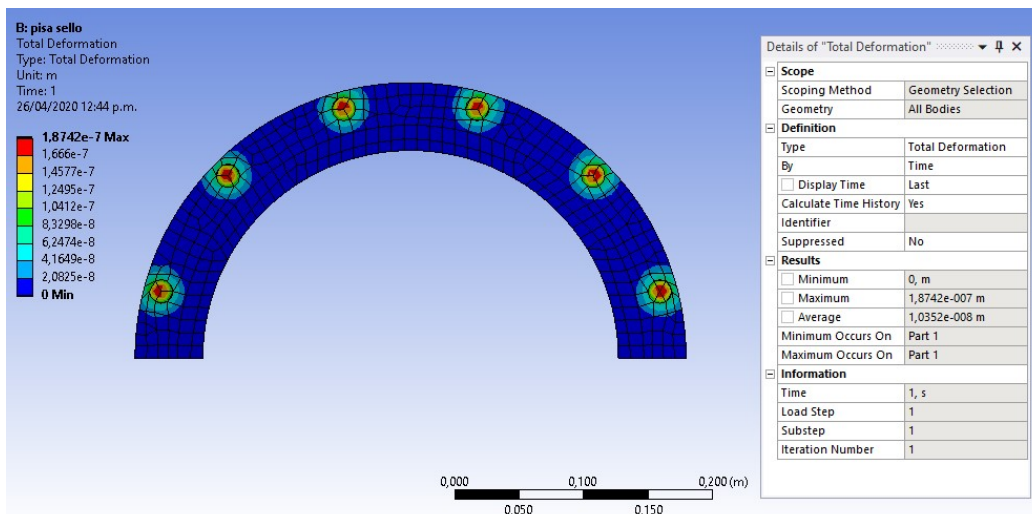


Figura 21. Deformación de la pieza en bronce (pisa sello).

Fuente: Elaboración propia.



Finalmente, para la tapa del sello en bronce se obtuvieron 28.288 nodos y 6.856 elementos, la calidad de este se detalla en la Figura 22 y el tamaño mínimo de los elementos obtenidos y la calidad asociada a cada uno de ellos en la Tabla 10. En la Figura 23 y 24 se pueden observar el mallado que presenta mejor calidad y baja calidad respectivamente, que están relacionados con el método aplicado y la calidad de la geometría obtenida. Para este caso el método es de elementos hexaédricos.

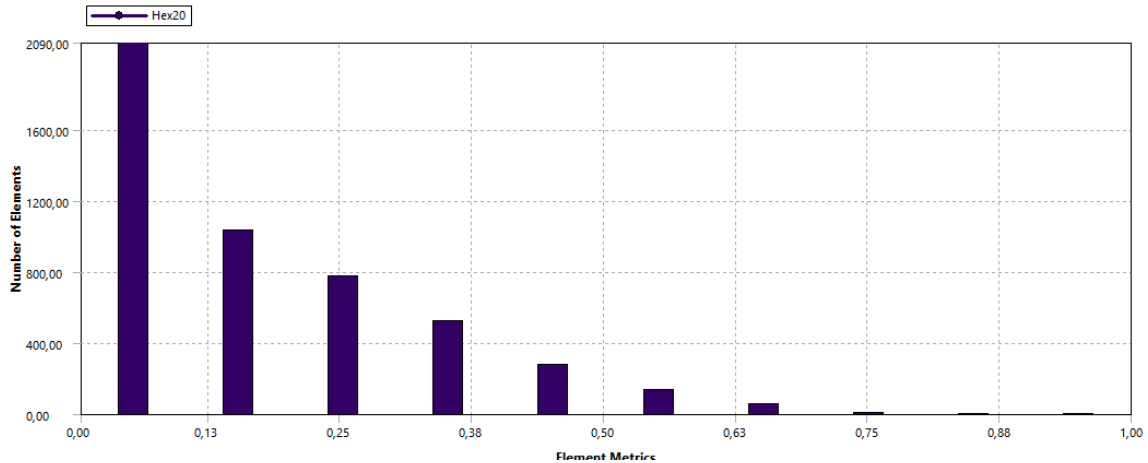


Figura 22. Elemento metricos del bronce (tapa sello).

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 10. Calidad de la malla y los elementos para bronce (tapa sello).

Método Hexaédrico dominante	Tamaño mínimo de elementos (m)	Número de elementos	Calidad de la malla
1	0,0544	2090	Buena
2	0,154	1040	Buena
3	0,253	774	Buena
4	0,353	525	Regular
5	0,452	278	Regular
6	0,552	136	Regular
7	0,651	56	Regular
8	0,751	8	Regular
9	0,851	1	Baja
10	0,95	1	Baja

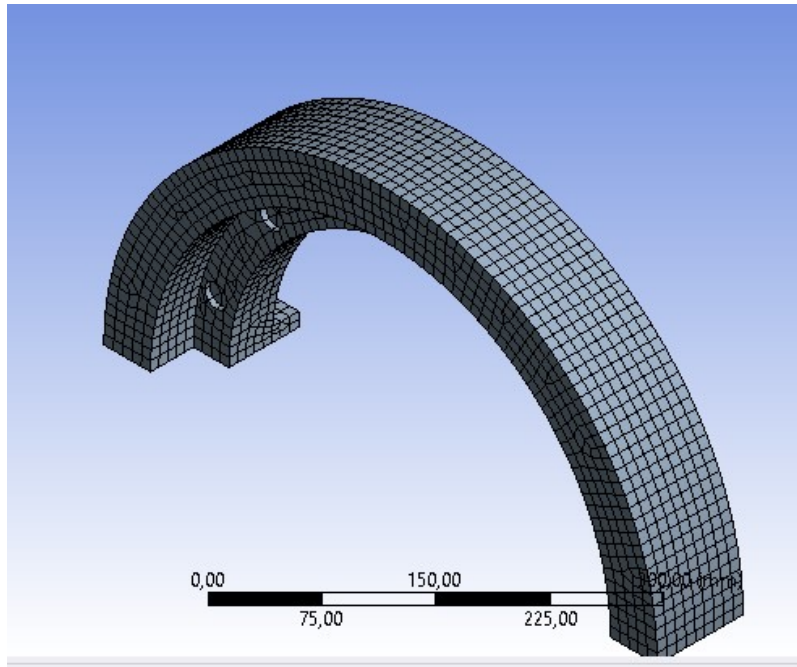


Figura 23. Elemento metricos del bronce (pisa sello).

Fuente: Elaboración propia.

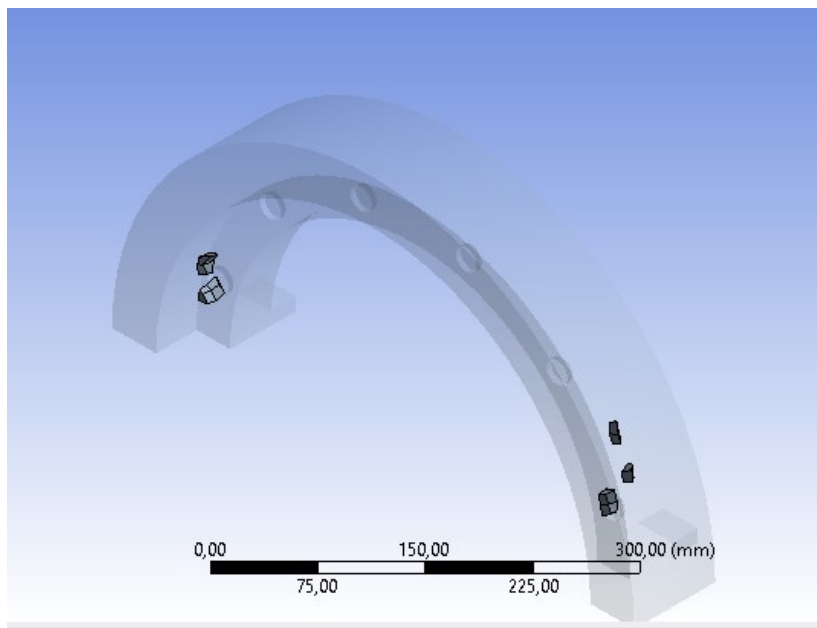


Figura 24. Elemento metricos de la pieza en bronce (pisa sello).

Fuente: Elaboración propia.

La deformación obtenida con el simulador es baja y cerca a los agujeros es donde se presenta la mayor probabilidad de que se desgaste la pieza, siendo lo esperado ya que el mecanizado por este sector de la pieza hace que el material no quede muy homogéneo (ver Figura 25).

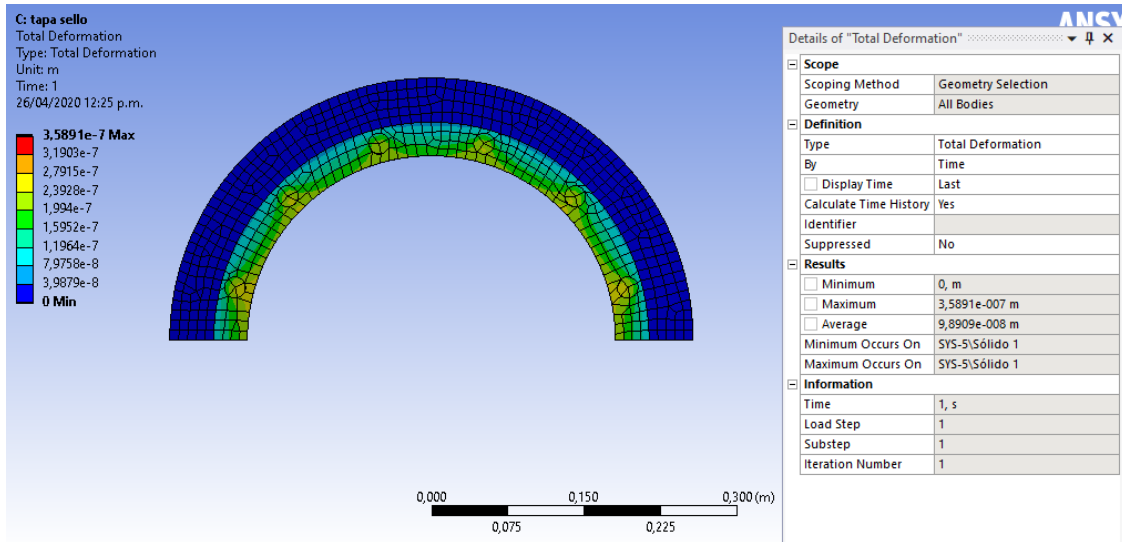


Figura 25. Deformación de la pieza en bronce (pisa sello)

Fuente: Elaboración propia.

En conclusión, se puede decir que, sin importar el método seleccionado de la malla el resultado obtenido es muy similar y esto garantiza los resultados obtenidos en la presente simulación. Además, para todas las piezas la deformación es muy baja y esto se puede contrastar más adelante con el factor de seguridad. Los resultados de deformación obtenidos para todas las piezas se sintetizan en la Tabla 11.

Tabla 11. Deformación de las piezas del sello.

Pieza	Deformación máxima (m)
Algodón fenólico (empaquetadura)	8.20E-06
Acero inoxidable (prensa-estopas)	9.50E-08
Bronce (anillo linterna)	1.90E-07
Bronce (tapa del sello)	3.60E-07

La seguridad de cada una de las piezas se relaciona con la probabilidad de falla de la estructura o equipo; mientras más baja sea esta probabilidad, más alto será el factor de seguridad. Tal y como se obtuvo con la simulación, estos superan el valor de 1 e incluso son mayores a 10 por lo que las piezas están diseñadas correctamente y por el contrario se puede incurrir en un sobre diseño que incida directamente en el costo de la pieza, pero que se debe de mantener porque al ser una pieza fundamental y unas dimensiones ya dadas por el fabricante del equipo en su conjunto no se pueden modificar, ya que de hacerlo se debe de hacer un cambio en todo el diseño de la turbina (ver Figuras 26, 27, 28 y 29).

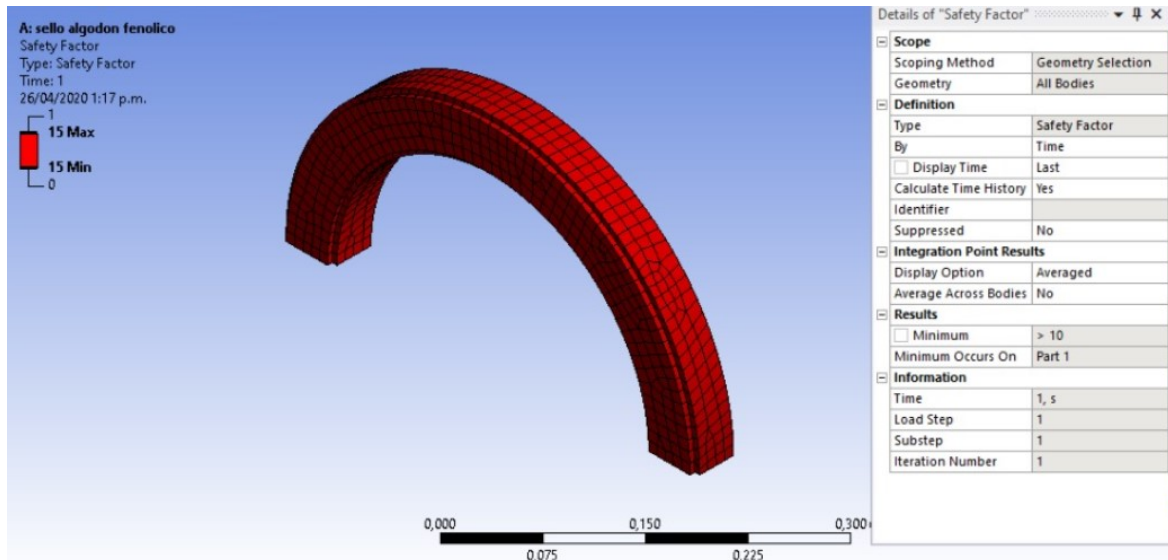


Figura 26. Factor de seguridad pieza en algodón fenólico.

Fuente: Elaboración propia.

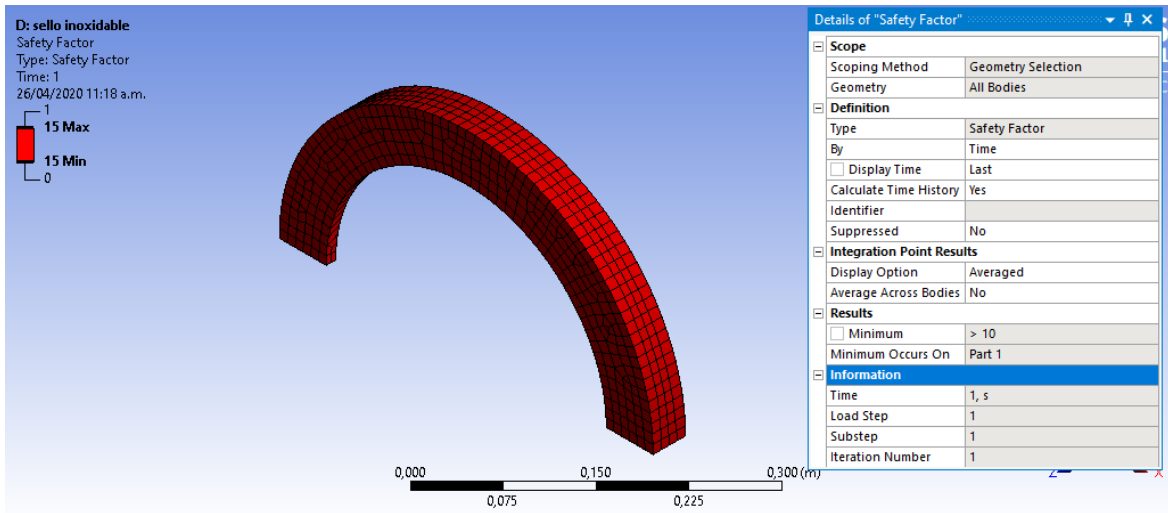


Figura 27. Factor de seguridad pieza en acero inoxidable.

Fuente: Elaboración propia.

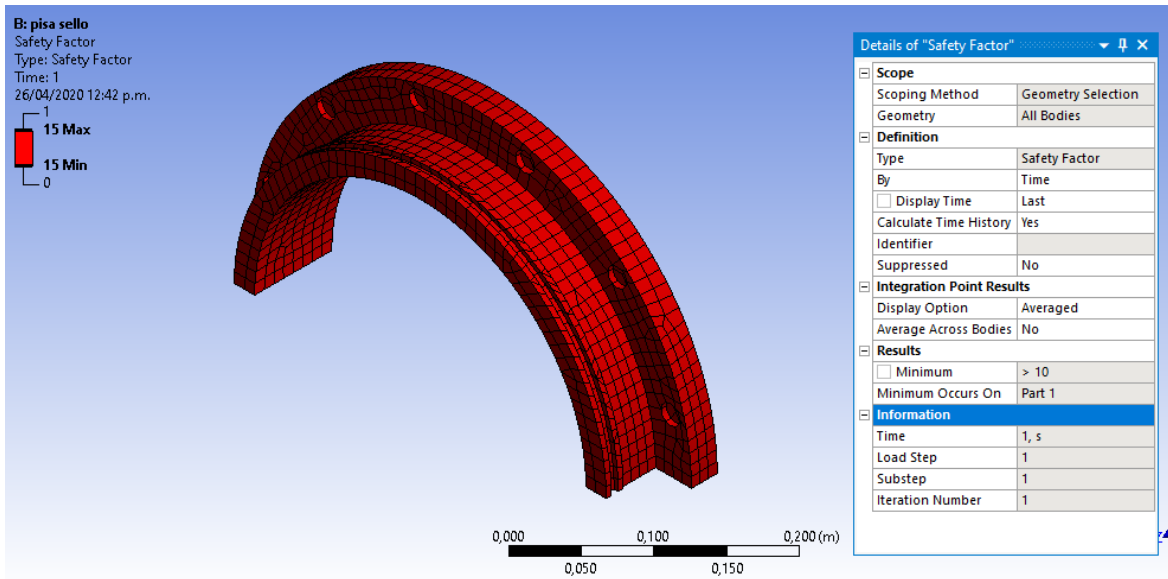


Figura 28. Factor de seguridad pieza en bronce (pisa sello).

Fuente: Elaboración propia.

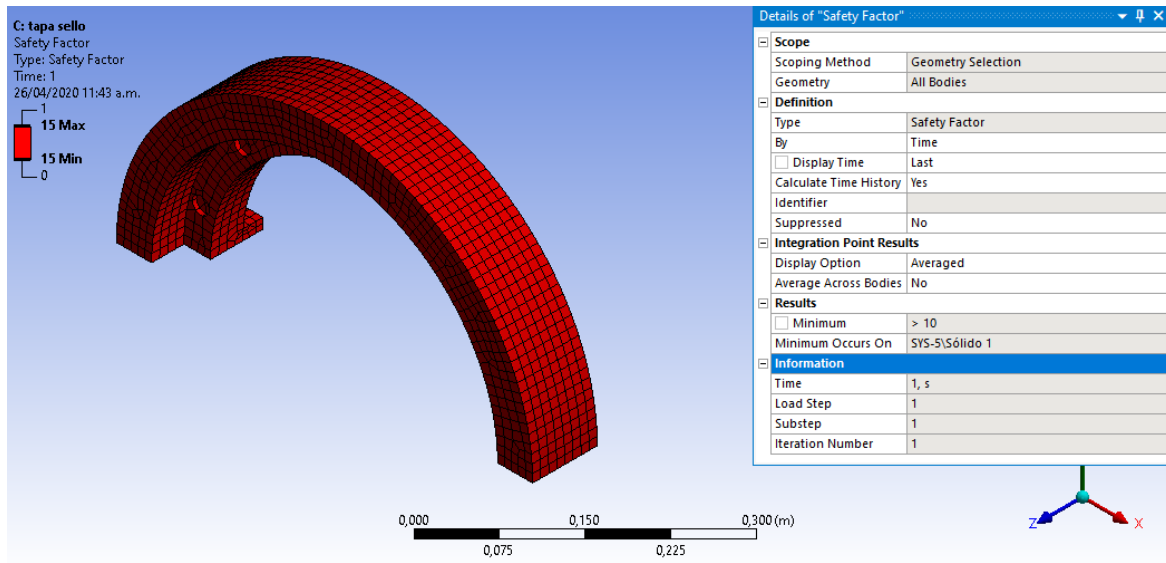


Figura 29. Factor de seguridad pieza en bronce (tapa sello).

Fuente: Elaboración propia.

Con base en dichos factores de seguridad y en el diseño obtenido en el Software se procedió a realizar la pieza ajustándose a los parámetros dimensionales y de materiales ya seleccionados (ver Figura 30). Y se logró entregar a la empresa un primer prototipo a ser empleado en planta entre junio y julio del 2020 (ver Figura 31) a partir de los planos que se encuentran en el anexo A.

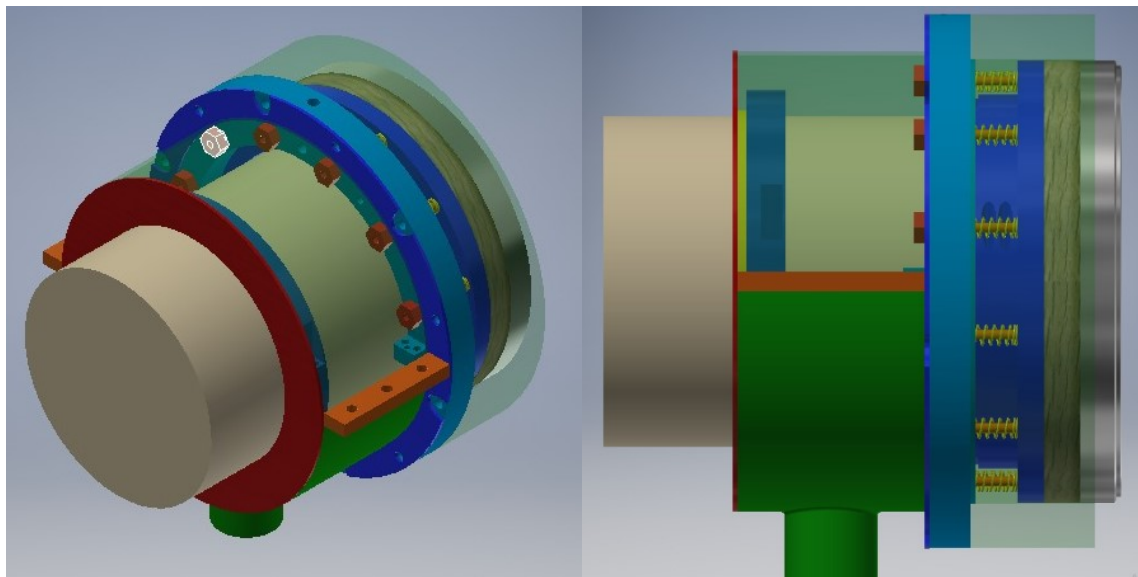


Figura 30. Diseño 3D del ajuste de la prensa-estopa para la turbina de la PCH el Popal.

Fuente: Elaboración propia



Figura 31. Sello de eje tipo prensa estopa re-diseñado para la turbina de la PCH el Popal.

Fuente: Elaboración propia

Como se observa, la empaquetadura es en algodón fenólico y se usa para evitar fugas, dando el ajuste necesario entre las piezas, la cual es debidamente presionada.

El anillo linterna y la tapa del sello están hechas de bronce y se ubica en medio de la empaquetadura, y conecta la tubería a la carcasa.

Y finalmente la prensa-estopa, el cual está hecho en acero y es el que presiona la empaquetadura mediante tornillos, disminuyendo el movimiento de las piezas de manera drástica, permitiendo la estabilidad del sistema.

## 6.5 Análisis de costos.

Se proyecta una inversión total de aproximadamente 56 millones que incluyen toda la parte de elaboración del sello con sus tres componentes y el montaje como se observa en la tabla 12. Es necesario tener en cuenta que no se realizarán modificaciones significativas que comprometan la integridad estructural de la turbina; por lo cual algunos componentes del diseño original serán utilizados (inyectores y barras de sujeción) y se utilizará la guarda fabricada anteriormente.

Tabla 12. Costos asociados a fabricación y montaje del sello de eje para la PCH El Popal (ver anexo B. Cotizaciones).

Cantidad	Descripción	Precio Unitario (COP)	Precio Total (COP)
1	Componentes de sistema prensa-estopa (anillo, prensa-estopa)	\$ 29,583,400	\$29,583,400
2	Empaquetadura Algodón fenólico	\$ 5,704,990	\$11,409,980
1	Costo de montaje y puesta en marcha	\$ 15,000,000	\$15,000,000
<b>TOTAL</b>			<b>\$55,993,380</b>

Esta pieza se proyecta con una vida útil de cinco años según el fabricante, y con un mantenimiento preventivo cada año. Sin embargo, se conservarán inicialmente los de rutina para verificar el correcto funcionamiento de la pieza (3 al año). Los costos que tiene comprar la pieza original, importarla y poner en marcha se muestran en la Tabla 13.

Tabla 13. Costos asociados al mantenimiento, importación y otros gastos del sello original.

Cantidad	Descripción	Precio Unitario (COP)	Precio Total (COP)
1	Repuestos de sello de eje de turbina	\$ 112,256,557	\$ 112,256,557
1	IVA	\$ 17,961,049	\$ 17,961,049
1	Costo de montaje y puesta en marcha	\$ 15,000,000	\$ 15,000,000
<b>TOTAL</b>			<b>\$ 145,217,606</b>

Al comprar el costo total de fabricar la pieza con los materiales seleccionados y la importación de la pieza original se puede observar una diferencia de \$89,224,226 COP, que se puede estar ahorrando la empresa. Además, la vida útil de la pieza original es de dos años y se debe de hacer tres paradas anuales para mantenimiento preventivo con el fin de proteger el equipo y personal que trabaja en su manipulación; esto aporta un costo



de \$20,000,000 COP anuales. Es decir, que la empresa se puede estar ahorrando alrededor de \$120,000,000 COP y además se estaría apoyando las empresas colombianas con la elaboración de la pieza rediseñada en el presente trabajo. Este es un buen avance dentro de la empresa Lareif, ya que las otras instalaciones se pueden ver beneficiadas con el desarrollo de este diseño y así generar un ahorro mayor para la empresa.

# 7. Conclusiones y recomendaciones

## 7.1 Conclusiones

- Se pudo levantar los requerimientos de la prensa-estopa original para poder conocer a detalle las características que este debía de tener para ser rediseñado, en términos de materiales con mejores características y así poder cumplir la función sin comprometer otras piezas.
- Se logró hacer una selección de los materiales y las características que debe de cumplir cada uno de ellos. Considerando importante la seguridad e integridad del equipo y el personal de trabajo, al obtener factores de seguridad mayor a 1.
- Se entregó un prototipo a ser empleado en la empresa durante los meses de junio y julio del 2020 con muy buenas características y con una vida útil de como mínimo 5 años o más.
- El costo en la fabricación del rediseño es más favorable que importar la pieza y los pares en el proceso se esperan que sean menor ya que se sugiere una vida útil mayor a la del fabricante. Y por otra parte al haber un ajuste mejor no hay daño en piezas asociadas.
- Este diseño puede ser empleado en las otras empresas que hacen parte de Lareif con lo cual se genera un ahorro superior al estipulado en el presente trabajo. Además, se apoya el mercado colombiano ya que la pieza nueva será de diseño local.

## 7.2 Recomendaciones

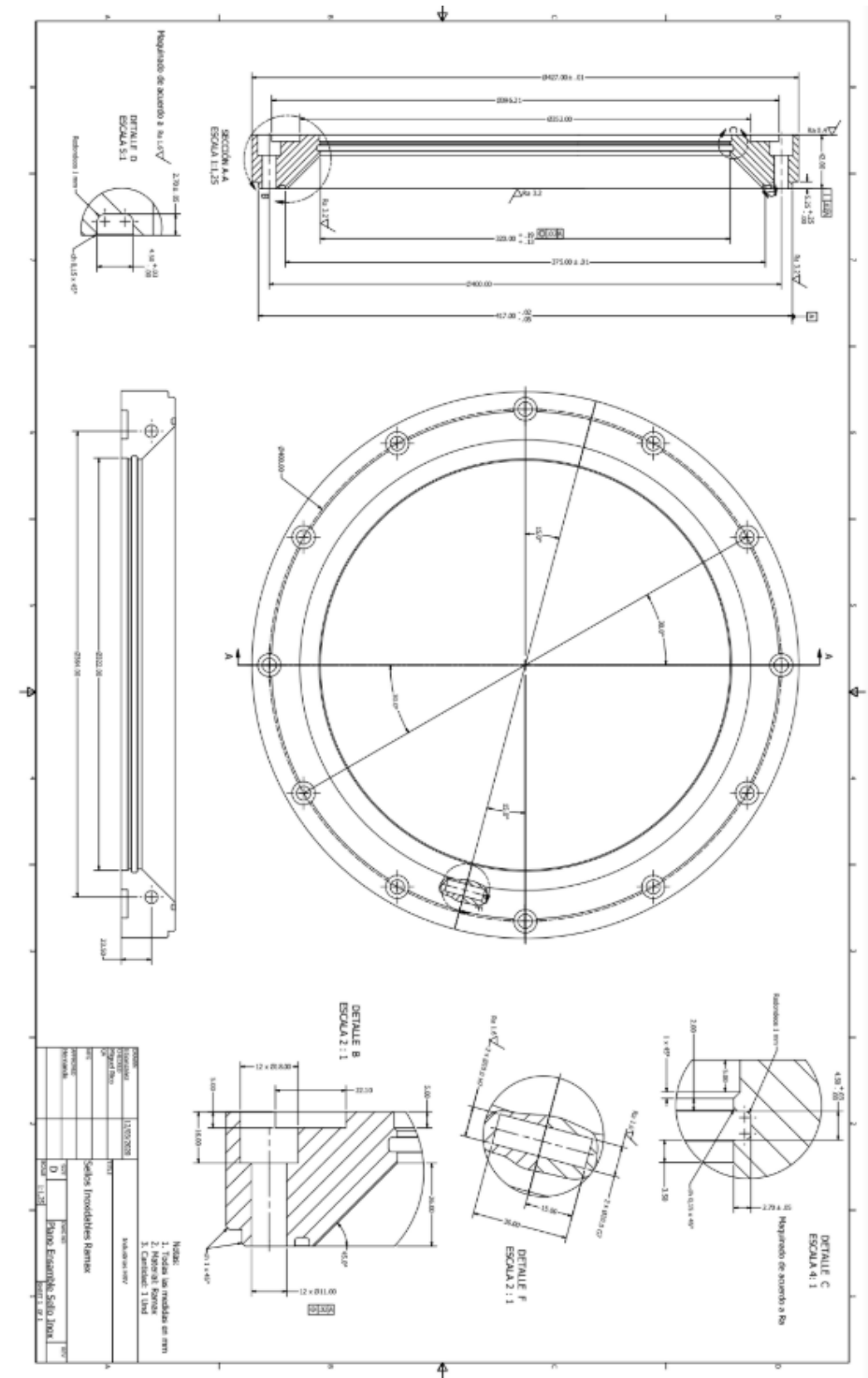
- Hacer constante seguimiento al piloto entregado con el fin de no ir a comprometer la pieza completa por algún daño mayor dentro del equipo.

- Hacer análisis de desgaste del mismo y compararlo con el historial de desgaste que presentaba el original siendo el tiempo igual para poder ser comparables.
- Mantener los mantenimientos preventivos 3 veces al año con el fin de ir estandarizando el tiempo de mantenimiento y vida útil del prototipo entregado.

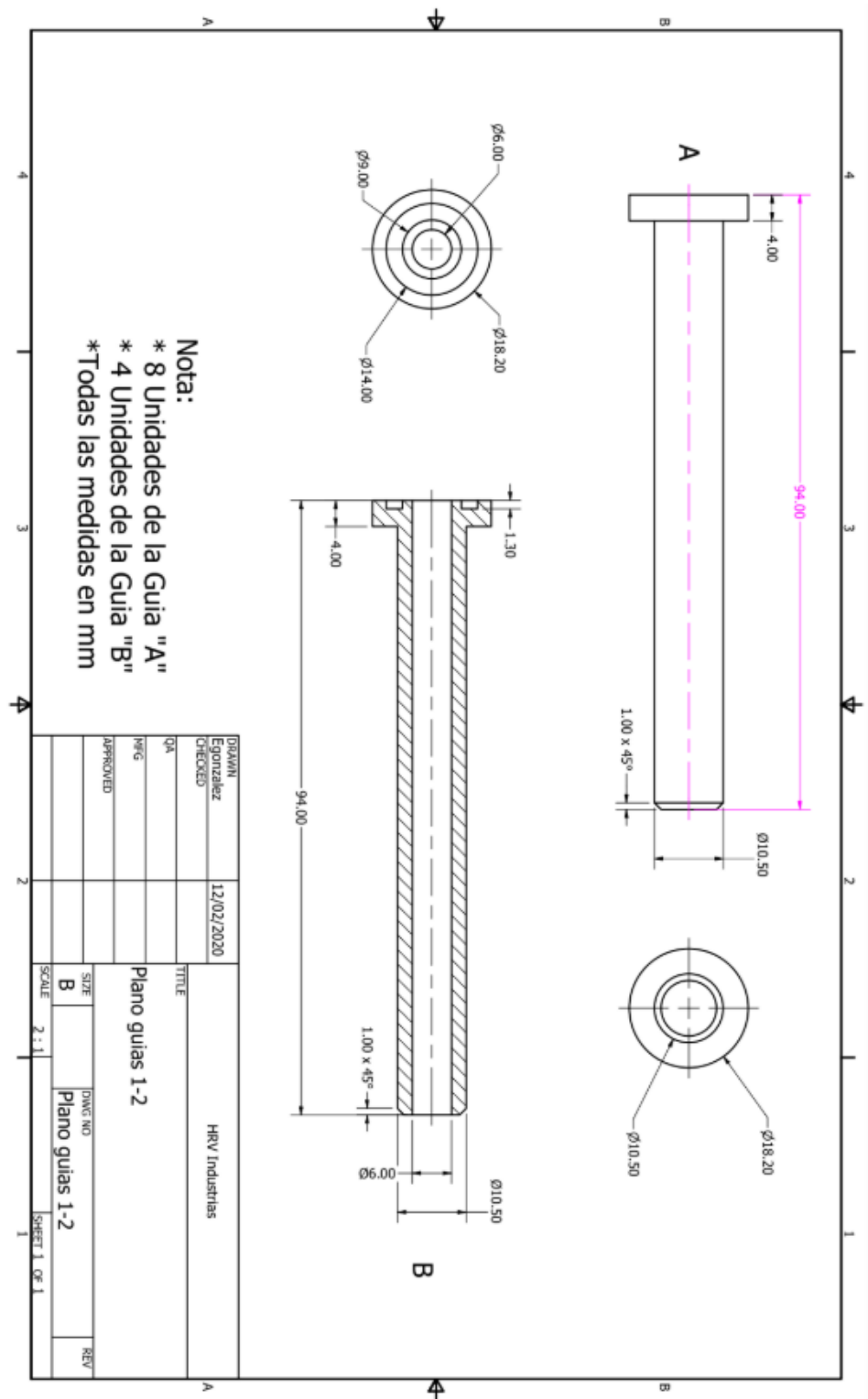




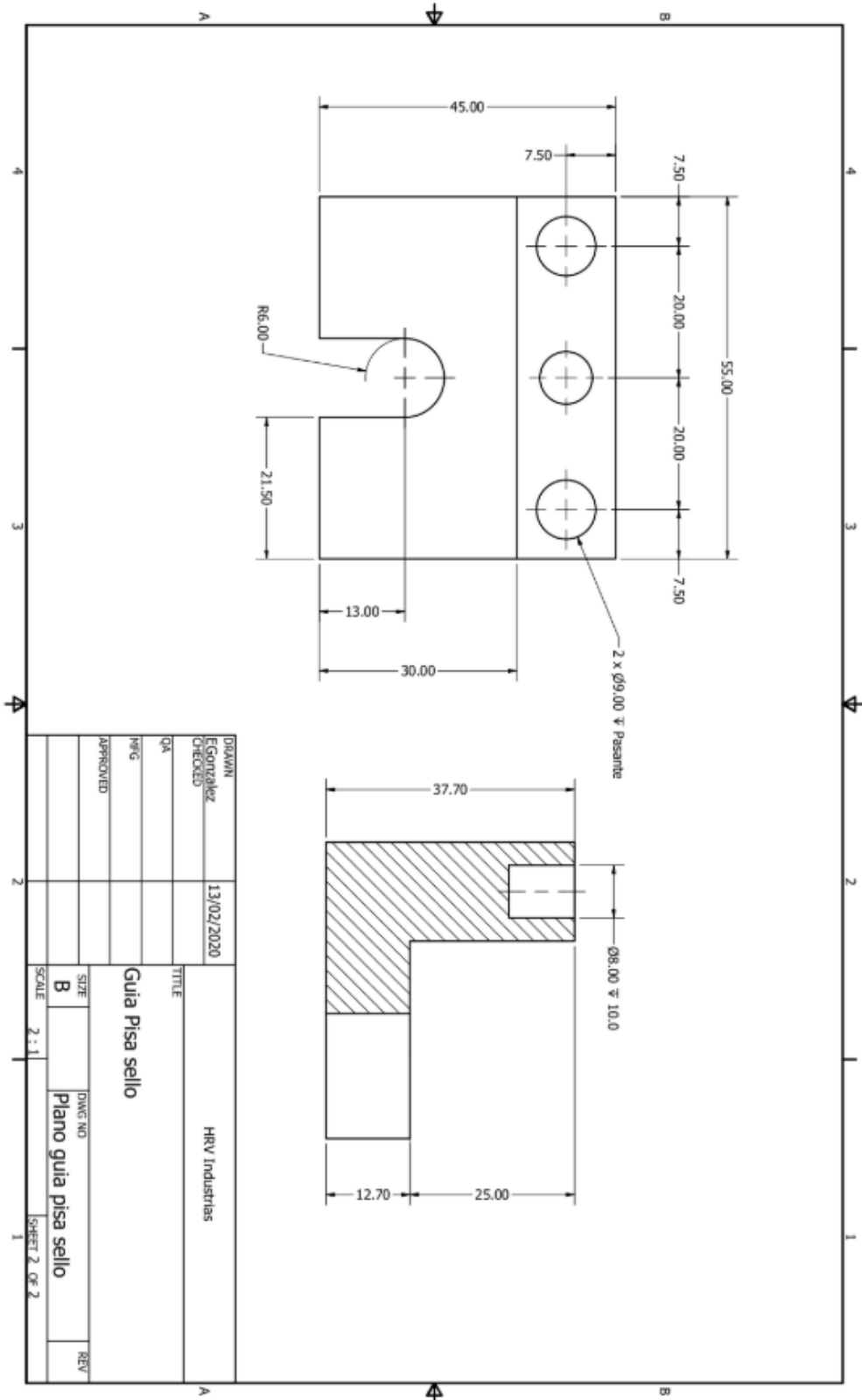
Plano de ensamble pieza de acero inoxidable



Plano guía 1-2

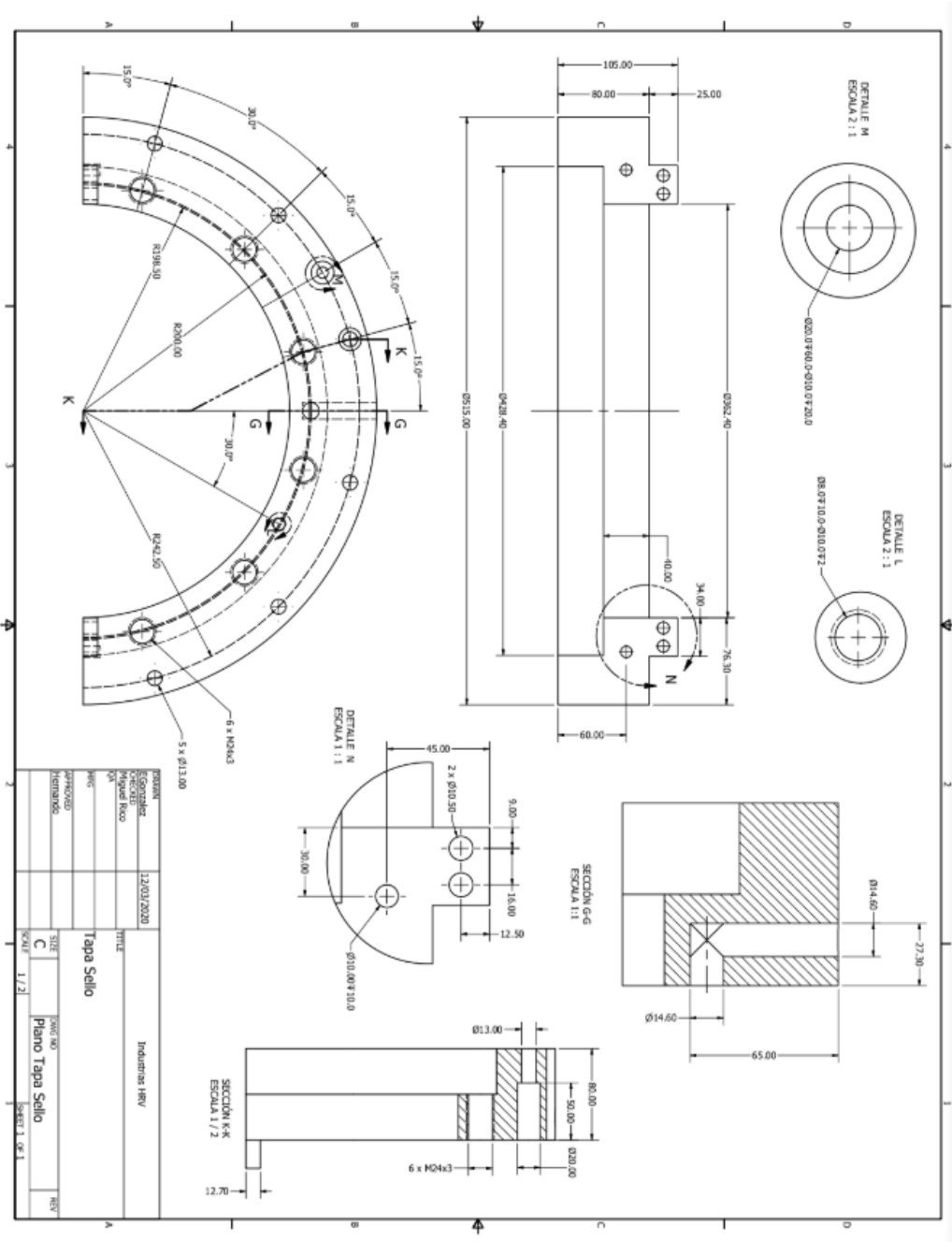


Plano guía pisa sello

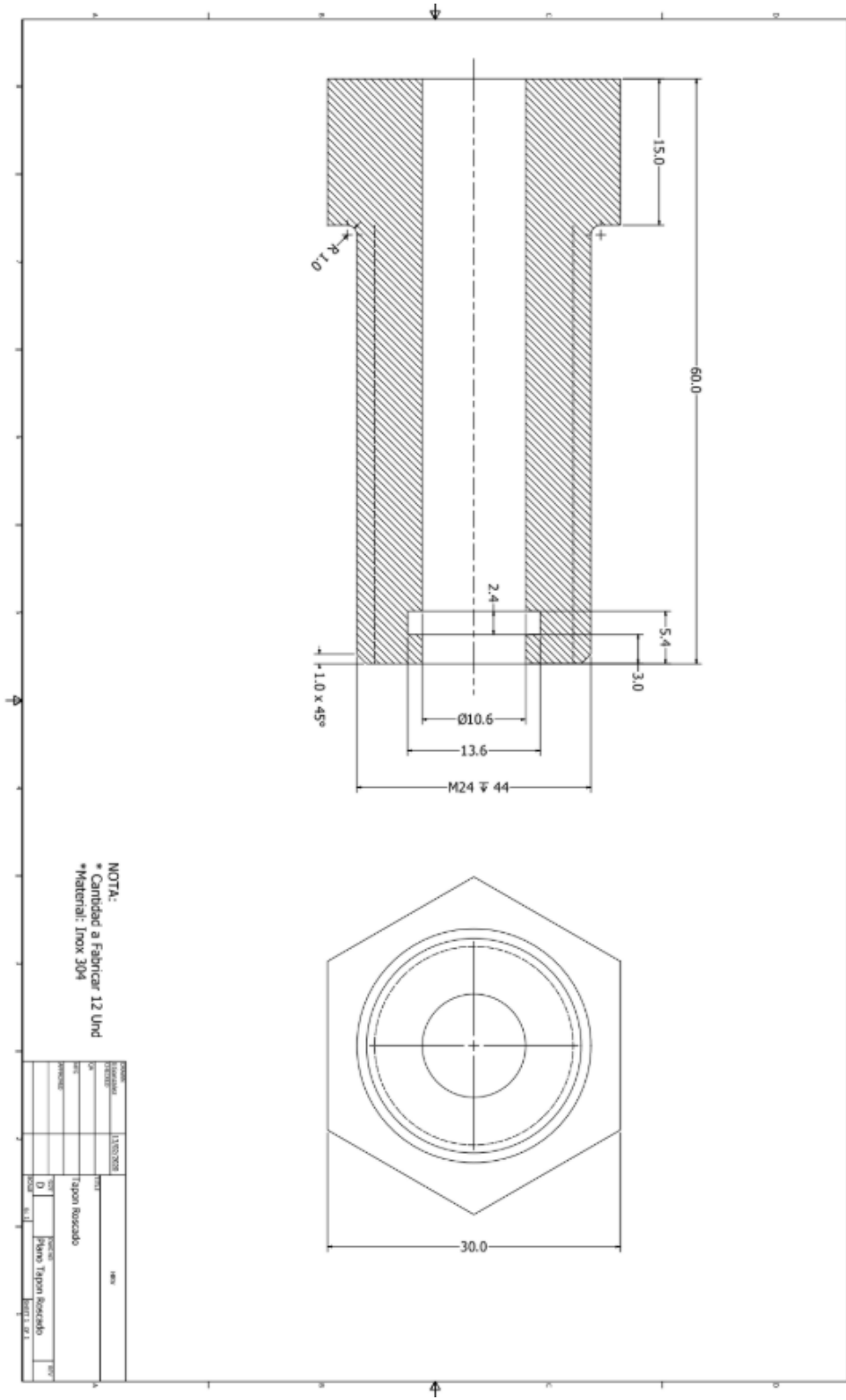




Plano tapa del sello



Plano tapón roscado









## COTIZACIÓN



## Observaciones

- Material ofrecido para el **anillo en acero inoxidable** y para las **guías pisa sello**, es Ramax de uddelhom, que es el comercial en nuestro medio y de la familia del solicitado en el plano, (Adjuntamos especificaciones de los dos materiales).
- El material ofrecido para **Pisa sello 1 y Pisa sello 3** es a partir de un anillo en bronce SAE 65 fundido.
- Las tolerancias no especificadas en planos se regirán con la norma ISO 2768 calidad media.
- La protección superficial para los componentes en acero al carbón, se ofrece con Pintura electrostática (igual a la utilizada en la fabricación de la guarda)

Validez de la oferta

15 días

Cotizó

Miguel Alejandro Rico

Oferta:	SW-LRF-110319
Para:	Lareif
Atn.	Ing. Mauricio Méndez
Objeto:	Oferta de Suministro de sellos
Oferente:	SWCOL SAS



30 de enero de 2020

OFERTA				
ITEM	DETALLE	Cantidad	Precio Unitario	Precio total
1	Sello segun plano de LARIEF en material DIN 7734 Hgw2082	2	€ 1.340	€ 2.680
<b>TOTAL DE LA OFERTA (DOS MIL SEISCIENTOS OCHENTA EUROS)</b>				<b>€ 2.680</b>

**NOTA: Los presentes precios son válidos únicamente por la compra de la totalidad de lo aquí ofertado (No aplican para compras parciales)**

## Condiciones comerciales:

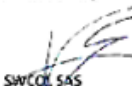

Tiempo de entrega: 5 semanas contadas a partir de la orden de compra

Término de entrega: DDP - Almacén Lareif - Medellín

Forma de pago: 100% contra entrega DDP

Validez de la oferta: 15 días

Atentamente,

  
  
 SWCOL SAS  
 NIT. 830.002.711-9  
 VÍCTOR HUGO AYALA CARREÑO  
 Representante Legal



2 (total 4)

- No incluye ningún tipo de configuración o soporte técnico.
- Lo que expresamente no este indicado en el alcance de la oferta.

## 2. PRECIOS

Ítem	Descripción	Cant.	Valor unitario	Valor ítem EUR
1	Repuestos de sello de eje de turbina según alcance descrito en el punto 1 (Caruquia / Guanaquitas)	GL	18.740	18.740
			<b>Subtotal</b>	<b>18.740</b>
			<b>IVA 16%</b>	<b>2.998,4</b>
			<b>Total</b>	<b>21.738,4</b>

Ítem	Descripción	Cant.	Valor unitario	Valor ítem EUR
1	Repuestos de sello de eje de turbina según alcance descrito en el punto 1 (Popal)	GL	26.236	26.236
			<b>Subtotal</b>	<b>26.236</b>
			<b>IVA 16%</b>	<b>4.197,76</b>
			<b>Total</b>	<b>30.433,76</b>

## 3. CONDICIONES COMERCIALES

### 3.1. Precios

Los precios que se describen en nuestra oferta se entienden en **EUROS (EUR)**. No incluyen ningún impuesto (IVA, Retención en la fuente, Timbre, etc.), tasas y/o derechos a pagar en Colombia, si no están claramente especificados.

El monto en EUROS será pagadero en PESOS COLOMBIANOS a la TRM de la fecha de presentación de la factura.

Precios validos únicamente en caso de un pedido global de los ítems.

### 3.2. Forma de Pago

50% Con la aceptación de la orden de compra.  
50% Contra entrega de los materiales DDP.

### 3.3. Plazo y sitio de Entrega

16 semanas de entrega a partir de la fecha de recibo y aceptación de la orden de compra.  
Sitio de Entrega: DDP en Almacén Larief en la ciudad de Medellín. Entrega en plataforma.



3 (total 4)

### 3.4. Validez

30 días a partir de la fecha.

### 3.5. Garantía

El periodo de garantía es de SEIS (6) meses contados a partir de la fecha de recepción de los equipos en el lugar de entrega.

Dentro del periodo de garantía, si ocurre alguna falla en los equipos, EL CLIENTE concederá al Contratista un plazo razonable para solucionar esta falla. Este plazo será fijado por mutuo acuerdo entre las partes.

La garantía no cubre los daños por abrasión, por operación de los equipos fuera de las condiciones normales, por obra de la naturaleza o por negligencia o accidentes de cualquier tipo de parte de personal de EL CLIENTE o de terceros.

Quedan además excluidos de esta garantía, daños causados por reparaciones o alteraciones realizadas por personal no autorizado por Andritz, daños físicos causados por fuerza mayor y defectos en equipos no suministrados por Andritz.

En caso de una falla de los equipos dentro del plazo de garantía, EL CLIENTE informará a Andritz dentro de un plazo de 10 días calendario sobre esta falla por escrito.

## CONDICIONES DEL GRUPO ANDRITZ HYDRO

Por razones de políticas de contratación de la empresa, a continuación manifestamos que ante cualquier contratación con nuestros clientes, se deben definir claras condiciones de limitación de responsabilidad de las partes y entre las partes.

De acuerdo con lo anterior, a continuación presentamos para su consideración, el siguiente párrafo de limitación de responsabilidad, que se ha tenido en cuenta en la elaboración de esta oferta, y que por lo tanto debe ser tenido en cuenta en el caso que haya lugar a un contrato.

**Responsabilidad.** La responsabilidad del contratista ante el Contratante no cubre daños y perjuicios indirectos o consecuenciales de cualquier tipo ó índole, en particular pero no limitándose a lucro cesante, pérdidas de ganancias o ingresos, costo capital. La responsabilidad del contratista bajo ningún título y tomando en cuenta las sanciones definidas en esta cláusula, no deben exceder en todo caso el Cincuenta por ciento (50%) del valor del contrato.



4 (total 4)

En espera que la presente información sea de su interés.

Quedamos atentos para tratar cualquier aclaración y esperamos que esta oferta cumpla con sus requerimientos.

Cordialmente,

A handwritten signature in black ink, appearing to read "Estephany A. Sabogal S." with a stylized flourish at the end.

**Estephany A. Sabogal S.**  
Sales Leader  
ANDRITZ Hydro Ltda

A handwritten signature in black ink, appearing to read "Carlos A. Paz O." with a large, sweeping flourish.

**Carlos A. Paz O.**  
Sales Leader  
ANDRITZ Hydro Ltda



## Bibliografía

- Ingfocol Ltda. «Atlas: Potencial Hidroenergético de Colombia.» 2020. [https://www1.upme.gov.co/Energia\\_electrica/Atlas/Atlas\\_p25-36.pdf](https://www1.upme.gov.co/Energia_electrica/Atlas/Atlas_p25-36.pdf).
- 360 EN CONCRETO. 360 EN CONCRETO. 2020. <https://www.360enconcreto.com/blog/detalle/hidroelectrica-el-popal-hmv-ingenieros>.
- Alacero. *Alacero*. 2020. <https://www.alacero.org/es/page/el-acero/caracteristicas-del-acero>.
- Alibaba. *Alibaba.com*. 2020. <https://spanish.alibaba.com/product-detail/high-strength-antimony-graphite-carbon-seal-ring-60699050035.html?spm=a2700.8699010.normalList.22.acdf6c342LFKDR>.
- Amaya Arias, Ángela María, y Luis Felipe Guzmán Jiménez. «LA INDUSTRIA ENERGÉTICA Y EL RECURSO HÍDRICO EN COLOMBIA.BREVE REFERENCIA AL CASO DE LA HIDROELÉCTRICA EL QUIMBO.» *Global Lure*, 2016: 183-210.
- ANDRITZ. «Francis horizontal .» 2020. <https://www.andritz.com/group-en/search?search=francis%20horizontal&sba=>.
- Aragon , Paola, Leonardo Perez, y Quesada José. «Universidad de Costa Rica .» *Diseño de un sello mecanico para el eje de una turbina hidráulica vertical* . octubre de 2015. [file:///C:/Users/COMPAQ/Downloads/38849%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/COMPAQ/Downloads/38849%20(1).pdf).
- Chang Chunhui, Zhai Yuemin. China Patente CN202301968U. 2012.
- Changxiang, Xu. Gland Seals. Estados Unidos Patente US20110254234A1. 2011.
- Comatec. «Algodón Fenólico.» 2015. <http://www.comatec.es/wp-content/uploads/2015/07/COMATEC-ALGODON-FENILICO.pdf>.
- CREGAS. *Lista de Empresas de energia- Generacion-Comercializacion* . s.f. [http://cregas.creg.gov.co/pls/directdcd/directorio\\_fmt.listar\\_sector\\_pub?sectact=E G](http://cregas.creg.gov.co/pls/directdcd/directorio_fmt.listar_sector_pub?sectact=E G).
- D'Alessandro, Manuel. *Rocas y Minerales*. 2020. <https://www.rocasyminales.net/bronze/>.

- DE MÁQUINAS Y HERRAMIENTAS. *DE MÁQUINAS Y HERRAMIENTAS*. 2019. <https://www.demaquinasyherramientas.com/mecanizado/como-elegir-sellos-mecanicos> .
- dspace. «Seminario de sellado de fluidos.» s.f. <https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/17106/1/ProyectoFiguroa.pdf> (último acceso: mayo de 2020).
- Electrocome. *Electrocome, s.l.* 2020. <https://www.electrocome.com/p-1-90/ALGODON-FENOLICO-Tipo-Hgw-2082.htm>.
- ElectroHuila. «ElectroHuila.» 2020. <http://www.electrohuila.com.co/Portals/0/Noticias/pch%20ok.pdf>.
- Figuroa Perez, JF. «Clasificación de los sellos mecánicos.» 2001. <https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/17106/1/ProyectoFiguroa.pdf>.
- Gallego Betancur, Juan Esteban. «Caracterización de una Turbina del tipo Francis utilizada por una Empresa Local de Generación de Energía.» Universidad EAFIT, Medellín, 2006.
- Garrido Martínez, Sergio. «Diseño y Estudio de una bomba Hidráulica Centrífuga mediante la Generación de su Prototipo Virtual.» Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 2017.
- Goodfellow. «Todos los materiales para la investigación científica y fabricación. Acero inoxidable.» 2020b. <http://www.goodfellow.com/S/Acero-Inoxidable-AISI-316.html>.
- . *Todos los materiales para la investigación científica y fabricación. Bronce.* 2020a. <http://www.goodfellow.com/S/Bronce-Aleacion.html>.
- HMV Ingenieros. *International Centre for Hydropower.* 2017. [https://ich.no/Opplastet/Dokumenter/Conference%202017/Documents/Small%20Hydro%20Workshop/2%20PCH\\_Lina%20Arango\\_%20EXPERIENCIA%20Y%20DESAF%20C3%8DOS%20EN%20EL%20DESARROLLO%20DE%20PCHs.pdf](https://ich.no/Opplastet/Dokumenter/Conference%202017/Documents/Small%20Hydro%20Workshop/2%20PCH_Lina%20Arango_%20EXPERIENCIA%20Y%20DESAF%20C3%8DOS%20EN%20EL%20DESARROLLO%20DE%20PCHs.pdf).
- INEA. *Guía de Diseño de Pequeñas Centrales Hidroeléctricas.* Santa Fé de Bogotá, D.C., 1997.
- Ingfocol Ltda. «Atlas Potencial Hidroenergético de Colombia 2015.» Bogotá, 2015.
- «La energía eléctrica y su afección ambiental en los ríos .» s.f. [http://www.crana.org/themed/crana/files/docs/232/047/afeccion\\_hidroelectrica.pdf](http://www.crana.org/themed/crana/files/docs/232/047/afeccion_hidroelectrica.pdf).

- Mora , Diego , y Jorge Hurtado . «Guía para estudios de prefactibilidad de pequeñas centrales hidroeléctricas como parte de sistemas híbridos.» 2004. <https://javeriana.edu.co/biblos/tesis/ingenieria/tesis15.pdf>.
- Morales , Sergio , Laura Corredor , Julio Paba, y Leonardo Pacheco. «Etapas de desarrollo de un proyecto de pequeñas centrales hidroelectricas: Contexto y criterios basicos de implementación.» *DYNA* 81 (abril 2014): 178-185.
- Morales Acevedo, Carlos Julián, y Fabián David Saavedra Martínez. «Diseño de una Pequeña Central Hidroeléctrica para el Municipio de Pisba, Boyacá.» Duitama, 2017.
- Pastrana, Ryan M., Christopher E. Wolfe, Norman A. Turnquist, y Mark E. Burnett. «Improved Steam turbine Leakage Control with a Brush seal Design.» *Proceeding of the 30th Turbomachinery Symposium*, 2001: 33-38.
- Pozuelo Díaz , Fracisco Javier . *Mantenimiento eficiente de las instalaciones de suministro de agua y saneamiento de edificios*. Málaga: IC Editorial, 2013.
- RAE. *Real Academia española* . 2020. <https://dle.rae.es/prensaestopas>.
- Ren, Guojun, y Ken Ogle. *Hydro-Turbine Main Shaft Axial Seals of Elastic Polymer. Principle and Practice*. Canadá: Thordon bearings Inc, 2001.
- Riba Romeva, Carles. *Selección de materiales en el diseño de máquinas*. Vol. I. Catalunya: Edicions UPC, 2008.
- Salazar Trujillo, Jorge Eduardo. *RESISTENCIA DE MATERIALES BÁSICA PARA ESTUDIANTES DE INGENIERÍA*. Manizales: Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales, 2007.
- Sanchez , Claudia . «Desgaste de máquinas hidráulicas en la generación hidroeléctrica.» *Colinnovacion* (5) 1 (junio 2016): 17-21.
- SKF. *Sellos radiales de eje*. 2020. <http://www.naiden.biz/co/products/seals/industrial-seals/power-transmission-seals/radial-shaft-seals/index.html>.
- Soriano, Raúl. *Sori Energy*. 17 de Agosto de 2019. <https://www.sorienergy.com/turbina-francis/>.
- Suárez Vargas, Natalia Andrea. «Revisión y Optimización del Montaje de Pruebas para un Sistema de Generación Electro-Hidráulica a Pequeña Escala.» Bogotá, D.C., 2014.
- Torres Quintero, Ernesto. «Investigación en pequeñas centrales en Colombia.» *Ingenio Libre* (Revista Ingenio Libre) 12 (2014): 1-15.

TRAXACO . *Componentes para sistema de riego* . 5 de Enero de 2010.  
<https://www.traxco.es/blog/productos-nuevos/generar-energia-electrica-con-el-agua>.

Universidad UBA. «juntas de estanqueidad, sellos laberínticos, curvas de fanno.» s.f.  
<http://materias.fi.uba.ar/6720/unidad8.PDF>.