

EFICIENCIA DE UN SISTEMA DE TRANSMISIÓN DE POTENCIA
NO CONVENCIONAL

CARLOS JULIO HIGUERA EFRES

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

FLORIDABLANCA

2020

EFICIENCIA DE UN SISTEMA DE TRANSMISIÓN DE POTENCIA
NO CONVENCIONAL

AUTOR

CARLOS JULIO HIGUERA EFRES

DIRECTOR

DR. ING. ROLANDO ENRIQUE GUZMÁN LÓPEZ

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

TRABAJO DE GRADO

FLORIDABLANCA

2020

Nota de aceptación

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Floridablanca, 03 de abril del 2020.

DEDICATORIA

Me llena de orgullo y satisfacción poder dedicarles esto a ellos, ya que con mucho esfuerzo y trabajo me lo he ganado:

A Dios por permitirme llegar a este punto de mi vida y poder cumplir mis sueños.

A mis padres, Carlos Julio Higuera López y Yolanda Efres Suarez por su apoyo, motivación y empuje sin los cuales no hubiese sido posible culminar esta meta.

A mi novia Paula Andrea Chaparro Castañeda por ser promotora de mis sueños, por confiar y creer en mí, por ayudarme a enfocar y enseñarme tanto en esta vida.

A todos mis familiares que de diferentes maneras me apoyaron y aconsejaron en aquellos momentos que más los necesité. En especial a Omar Alberto Chacón Efres Q.E.P.D, Cecilia Suarez Villamizar Q.E.P.D y Juan Carlos Efres Suarez familiares que no están presentes y con quienes me gustaría celebrar con euforia este logro.

Del mismo modo a mis compañeros y colegas con los que compartí este proceso de formación profesional y de los que me llevo gratos recuerdos e historias.

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Ing. Rolando Enrique Guzmán López director del proyecto de grado por su asesoría, orientación y apoyo durante todo el tiempo en que se desarrolló este proyecto.

A Álvaro Andrés Albis Pérez por su amabilidad, disponibilidad y ayuda.

A Ludwing Casas por prestar su servicio, tiempo y trabajo.

A mis compañeros de universidad que se interesaron en el proyecto y aportaron con múltiples ideas.

A las personas que de diferentes maneras participaron en el desarrollo del proyecto.

Finalmente, a la Universidad Pontificia Bolivariana sección al Bucaramanga por facilitar espacios y herramientas para llevar a cabo el proceso de investigación, fabricación y montaje del sistema.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
1. INTRODUCCIÓN.....	14
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	16
3. ANTECEDENTES.....	18
4. JUSTIFICACIÓN.....	22
5. OBJETIVOS DEL TRABAJO DE GRADO.....	23
5.1. OBJETIVO GENERAL:.....	23
5.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS:.....	23
6. MARCO TEÓRICO.....	25
6.1. SISTEMAS DE TRANSMISIÓN DE POTENCIA.....	25
6.1.1. Transmisión por cadena.....	26
6.1.2. Transmisión por cardan.....	26
6.1.3. Transmisión por engranajes.....	26
6.1.3.1. <i>Engranajes cilíndricos de dientes rectos</i>	27
6.1.3.2. <i>Engranajes helicoidales</i>	27
6.1.3.3. <i>Engranajes espina de pescado</i>	27
6.1.4. Transmisión por polea o correa.....	27
6.2. ALTERNATIVAS PRELIMINARES DE PROYECTOS.....	28
6.2.1. Sistema rueda dentada-linterna.....	29
6.2.2. Columbia Chainless Bicycle.....	30

6.2.3.	The world's most efficient drivetrain.....	31
7.	METODOLOGÍA.....	33
7.1.	DISEÑO CONCEPTUAL DEL SISTEMA SEGÚN DAVID G. ULLMAN	34
7.1.1.	Restricciones consideradas.....	35
7.1.2.	Descripción de la alternativa seleccionada	36
7.1.3.	Optimización de la alternativa seleccionada	38
7.1.4.	Descubrimiento del producto	40
7.1.5.	Especificaciones de ingeniería para cada requerimiento	50
7.1.6.	Diseño de engranajes.....	51
7.1.7.	Diseño de rueda dentada	52
7.1.8.	Relación de transmisión	56
7.2.	DISEÑO AVANZADO DEL SISTEMA SEGÚN DAVID G. ULLMAN.....	57
7.2.1.	Optimización de la solución conceptual	62
7.2.2.	Diseño de la flecha	64
7.2.3.	Diseño soportes	66
7.2.4.	Parámetros del banco de pruebas.....	68
7.2.5.	Montaje del sistema de transmisión.....	70
7.2.6.	Planos de componentes	73
7.2.7.	Variaciones del sistema.....	76
7.3.	COTIZACIONES.....	80
7.4.	PRODUCCIÓN Y MONTAJE DEL SISTEMA.....	81
8.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	83
8.1.	ERRORES EN LA MEDICIÓN.....	83

8.2.	CÁLCULO EFICIENCIA MECÁNICA	84
8.3.	VENTAJAS	86
8.4.	DESVENTAJAS.....	86
8.5	MANTENIMIENTO.....	87
9.	CONCLUSIONES	88
10.	RECOMENDACIONES.....	90
	BIBLIOGRAFÍA.....	91
	ANEXOS	94

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Aporte investigativo.....	17
Tabla 2. Modelo de fases de diseño.	34
Tabla 3. Optimización de la alternativa seleccionada.....	39
Tabla 4. Matriz DOFA del sistema	40
Tabla 5. Análisis Pro-Con.	42
Tabla 6. Modelo de fases de diseño	57
Tabla 7. Ingeniería Inversa aplicada en el análisis de un sistema de transmisión .	58
Tabla 8. Cotizaciones	80
Tabla 9. Eficiencias mecánicas-sistemas de transmisión.....	85

LISTA DE ILUSTRACIONES

	Pág.
Ilustración 1. Sistema de rueda dentada – Interna	30
Ilustración 2. Columbia Chainless Bicycle.....	31
Ilustración 3. The world’s most efficient drivetrain	32
Ilustración 4. Secuencia de desarrollo de la metodología	37
Ilustración 5. Diseño seleccionado.....	43
Ilustración 6. Diagrama función general.....	43
Ilustración 7. Alternativa ensamblada	44
Ilustración 8. Selección de alternativa.....	45
Ilustración 9. Ingeniería Inversa aplicada en el análisis de un sistema de transmisión	45
Ilustración 10. Sub-ensamblaje de la flecha.....	49
Ilustración 11. Ensamblaje del sistema de transmisión de potencia	49
Ilustración 12. Rueda dentada	53
Ilustración 13. Diseño rueda dentada	55
Ilustración 14. Relación de transmisión.....	56
Ilustración 15. Cambios sub-ensamblaje flecha	62
Ilustración 16. Cambios en piñones	63
Ilustración 17. Cambio en soporte de rodamiento - Chumacera	63
Ilustración 18. Cambio soporte estructura.....	64
Ilustración 19. Diseño flecha.....	65

Ilustración 22. Cálculo soporte.....	67
Ilustración 23. Deflexión soporte.....	68
Ilustración 24. Placa características motor trifásico.....	69
Ilustración 25. Vista motor eléctrico	69
Ilustración 26. Planeación de montaje experimental	70
Ilustración 27. Montaje tentativo piñón.....	71
Ilustración 28. Montaje tentativo	71
Ilustración 29. Ensamblaje gráfico del sistema de transmisión de potencia	72
Ilustración 30. Plano piñón 10T.....	73
Ilustración 31. Plano corona 20T	74
Ilustración 32. . Plano rueda dentada 12T	75
Ilustración 33. Mayor distancia entre centros	76
Ilustración 34. Cambio de sentido de giro	77
Ilustración 35. Entrega de potencia a mas de un eje usando la misma flecha	77
Ilustración 36. Entrega de potencia a dos ejes usando la misma flecha, un eje conserva el sentido de giro y el otro lo cambia	78
Ilustración 37. Entrega de potencia a múltiples ejes usando la misma flecha, unos conservan el sentido de giro y otro lo cambia	78
Ilustración 38. Impresión 3D	81
Ilustración 39. Montaje final del sistema de transmisión	82
Ilustración 40. Error en medición	83
Ilustración 41. Torque del sistema	84
Ilustración 42. Especificaciones torquímetro	94
Ilustración 43. Ficha técnica PLA.....	95

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITULO: EFICIENCIA DE UN SISTEMA DE TRANSMISIÓN DE POTENCIA NO CONVENCIONAL

AUTOR(ES): Carlos Julio Higuera Efres

PROGRAMA: Facultad de Ingeniería Mecánica

DIRECTOR(A): Rolando Enrique Guzmán López

RESUMEN

Diseño, construcción y montaje de un sistema de transmisión de potencia no convencional de baja potencia (menor de 746 w), el cual se diseñó siguiendo la metodología de diseño mecánico de David G. Ullman. El sistema no se encuentra actualmente en ningún mercado, por lo que en su diseño y construcción fue necesario conocimientos de diferentes áreas de la ingeniería mecánica. Se construyó principalmente con piezas de impresión 3d con material PLA y posteriormente se instaló en un motor eléctrico de 373 W y 1600 rpm en la Universidad Pontificia Bolivariana, seccional Bucaramanga, donde con pruebas se pudo determinar su eficiencia mecánica.

PALABRAS CLAVE:

Eficiencia mecánica, sistema de transmisión, potencia, diseño metodológico.

GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE

TITLE: EFFICIENCY OF A POWER TRANSMISSION SYSTEM NON-CONVENTIONAL

AUTHOR(S): Carlos Julio Higuera Efres

FACULTY: Facultad de Ingeniería Mecánica

DIRECTOR: Rolando Enrique Guzmán López

ABSTRACT

Design, construction and assembly of an unconventional low power transmission system (less than 746 w), which was designed following the mechanical design methodology of David G. Ullman. The system is not currently found in any market, so its design and construction required knowledge of different areas of mechanical engineering. It was mainly built with 3d printing parts with PLA material and was later installed in a 373 W and 1600 rpm electric motor at the Universidad Pontificia Bolivariana, Bucaramanga section, where tests could determine its mechanical efficiency.

KEYWORDS:

Mechanical efficiency, transmission system, power, methodological design.

1. INTRODUCCIÓN

La presente investigación se refiere al tema de sistemas de transmisión que son los encargados de transferir potencia entre dos o más elementos de un mecanismo, existen entre los más comunes, cadena, bandas y cardan, los cuales tienen porcentajes de eficiencias mecánicas delimitadas.

Teniendo esto en cuenta se busca con la investigación realizar un diseño y fabricar un sistema de transmisión de potencia que permita aumentar las eficiencias ya establecidas, mejorando aspectos de diseño como la disminución de puntos que permanezcan en contacto a través de diferentes tipos de mecanizado y procesos de fabricación que eliminen algunas de las pérdidas por fricción y sincronización.

Con el desarrollo de este proyecto no solo se busca la fabricación de dicho sistema sino también su instalación en un sistema de entrega de potencia; motor eléctrico de 373 W y 1600 rpm. Para obtener su eficiencia mecánica las pruebas por medio de un taquímetro son claves en la obtención de datos.

Por otra parte, para la elaboración de este trabajo se sigue una metodología de investigación basada en el autor David G. Ullman quien en su libro proceso de diseño mecánico¹ determina 4 fases fundamentales; Ideación, desarrollo conceptual y básico, desarrollo avanzado y lanzamiento o producción definitiva.

¹ **G. Ullman, David.** 2017. *The Mechanical Design Process*. Sexta. s.l. : McGraw Hill, 2017

Adicionalmente este sistema podría ser usado en diferentes prácticas de laboratorio de materias como diseño de máquinas y análisis de mecanismos.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Perdidas de eficiencia por sistemas de transmisión convencionales.

“Los sistemas de transmisión de potencia tienen la función de trasladar la energía mecánica entre los elementos de un mecanismo”² estos tienen diferentes porcentajes de eficiencia debido a la fricción, desgaste y condiciones mecánicas a las que se somete cada sistema.

Por esta razón, se busca mejorar la eficiencia mecánica principalmente de la cadena a través de un diseño conceptual de un sistema de transmisión alternativo. En el estado del arte se encontró un sistema complejo como prototipo, el cual brinda algunos aportes para la investigación de soluciones alternativas mediante un fácil mecanizado, con menor cantidad de piezas y materiales más comunes en el mercado que permitan minimizar costos y ser implementado en cualquier sistema de entrega de potencia en la industria.

² Calero Pérez , Roque y Carta Gonzales, José Antonio. 1999. Fundamentos de mecanismos y máquinas para ingenieros. Madrid : McGraw-Hill, 1999.

Tabla 1. Aporte investigativo

Título	Problema	Solución	Aporte
<p>“The world’s most efficient drivetrain”</p> <p>2018 Eurobike.</p>	<p>Perdida de eficiencia mecánica en los sistemas de transmisión potencia bicicletas, principalmente cadenas.</p>	<p>Conseguir un 49% menos de fricción de respecto a la cadena, en eliminando los puntos de articulación de la cadena.</p>	<p>*Estrategias para conseguir menos fricción y por tal más eficiencia.</p> <p>*Recomendaciones para futuros desarrollos.</p> <p>*Investigaciones y estadísticas.</p> <p>Autores para tener en cuenta.</p>

Fuente: Autor.

3. ANTECEDENTES

- **Título:** Mechanical power transmission system and method.

Autor: Ernie Brookins y West Fargo³

Resumen: Es una patente norteamericana en la que se diseña un nuevo sistema de transmisión de potencia mecánica para transformar y suministrar potencia eficientemente y efectivamente usando presión externa para impulsar un vehículo, promete combinar muchas de las ventajas de los sistemas de transmisión ya existentes. Describe detalladamente el funcionamiento del sistema y sus características más importantes, además de los planos y dibujos anexados.

Año: 2013

- **Título:** Estudio y optimización del comportamiento mecánico de una transmisión tipo Cardan de una motocicleta⁴

Autor: Martínez-Hernández, Eduardo

³ Ernie Brookins, West Fargo, ND (US). 2013 . *Mechanical power transmission system and method.* US 8,517,888 B1 United States , 27 de Agosto de 2013.

⁴ Martínez-Hernández, Eduardo(Tesis de Pregrado). 2019. *Estudio y optimización del comportamiento mecánico de una transmisión tipo Cardan de una motocicleta.* UNIVERSIDAD DE JAÉN. Jaén : s.n., 2019.

Resumen: Se aplica el método de elementos finitos a un problema complejo usando software, para mejorar la calidad de los diseños gracias a la opción de poder ser optimizados sin necesidad de fabricarlos. Se reduce el tiempo de diseño, fabricación y costes de cualquier proyecto aplicando esta técnica, se estudia el caso de una transmisión por Cardan en una motocicleta con el fin de mostrar su posible fuente aplicación.

Año: 2019

- **Título:** Utilización de Sistemas Basados en Reglas y en Casos para diseñar transmisiones por tornillo sinfín⁵

Autor: Jorge Laureano Moya-Rodríguez, Ana María Becerra-Ferreiro, César A. Chagoyén-Méndez

Resumen: Las técnicas de Inteligencia Artificial se aplican hoy en día a diferentes problemas de Ingeniería, especialmente los Sistemas Basados en el Conocimiento. Entre estos últimos los más comunes son los Sistemas Basados en Patrones, los Sistemas Basados en Reglas, los Sistemas Basados en Casos y los Sistemas Híbridos. Los Sistemas Basados en Casos parten de problemas resueltos en un dominio de aplicación y mediante un proceso de adaptación, encuentran la solución a un nuevo problema. Estos sistemas pueden ser usados con éxito para el diseño

⁵ Jorge Laureano Moya-Rodríguez, A. M.-F.-M. (Enero-abril de 2012). Utilización de Sistemas Basados en Reglas y en Casos para diseñar transmisiones por tornillo sinfín. Ingeniería Mecánica, 15(1).

de engranajes, particularmente para el diseño de transmisiones por tornillo sinfín, sin embargo ello constituye un campo de las aplicaciones de la Inteligencia Artificial aún inexplorada.

Año: 2012

- **Título:** Optimización de la transmisión de potencia en sistemas de transmisión mediante correas trapezoidales.⁶

Autor: Sebastián Alejandro Guajardo Oyarzún

Resumen: Para lograr el objetivo principal de este estudio se empezó entendiendo los tipos de sistemas de transmisión por correas. Además del tipo de material y sus elementos de construcción. Finalizando el capítulo 1 la clasificación de los tipos de correas y el diseño de una transmisión por correas. Se realiza también un punto final que nos indica la importancia monetaria que nos arroja el hecho de no tener un plan de mantención adecuado para estos sistemas.

SKF por su parte ha diseñado correas Xtra Power que son correas diseñadas para una transmisión óptima las que son detalladas con claridad.

Año: 2013.

⁶ Oyarzún, Sebastián Alejandro Guajardo. 2013. *OPTIMIZACIÓN DE LA TRANSMISIÓN DE POTENCIA EN SISTEMAS DE TRANSMISIÓN MEDIANTE CORREAS TRAPEZOIDALES* (Tesis de Pregrado). Universidad del Bío-Bío. Biobío : s.n., 2013.

- **Título:** The world's most efficient drivetrain.⁷

Autor: CeramicSpeed™.

Resumen: CeramicSpeed junto con el departamento de ingeniería mecánica de la universidad de colorado han creado un concepto de transmisión con un 99% de eficiencia mecánica volviéndola en el sistema de transmisión de potencia más eficiente del mundo, eliminando puntos de fricción y usando rodamientos cerámicos lograron disminuir un 49% de fricción respecto a la cadena.

Año: 2018.

⁷ *The world's most efficient drivetrain.* CeramicSpeed™. 2018. Denmark : s.n., 2018.

4. JUSTIFICACIÓN

Los sistemas de transmisión de potencia son una parte esencial en el funcionamiento de mecanismos o máquinas; son las encargadas de trasladar la potencia con el objetivo de mover piezas necesarias para su funcionamiento⁸. Teniendo en cuenta que los sistemas de transmisión de potencia convencionales tienen porcentajes de eficiencias mecánicas delimitadas así como ventajas y desventajas en su aplicación en diferentes regímenes de potencia, surge este proyecto de la necesidad de mejorar la eficiencia mecánica de los sistemas de transmisión de potencia convencionales reduciendo la fricción y esfuerzos mecánicos.

La finalidad del proyecto es diseñar, fabricar y adaptar un sistema alternativo a una entrega de baja potencia (*) en la cual se puedan obtener datos experimentales con el fin de realizar una comparación entre diferentes sistemas de transmisión. En el diseño se busca un fácil mecanizado; reduciendo los planos de maquinado y materiales accesibles para minimizar los costos de fabricación que a la larga se verían reflejados en el costo final del producto.

⁸ Calero Pérez , Roque y Carta Gonzales, José Antonio. 1999. *Fundamentos de mecanismos y máquinas para ingenieros*. Madrid : McGraw-Hill, 1999.

*Sistema impulsado por un motor eléctrico (0.5Hp) ubicado en el laboratorio de diseño del campus universitario.

5. OBJETIVOS DEL TRABAJO DE GRADO

5.1. OBJETIVO GENERAL:

Diseñar y fabricar un sistema de transmisión de potencia alternativo de baja potencia, aplicando la metodología sistemática de diseño según David G. Ullman para comparar su índice de eficiencia mecánica con los de sistemas de transmisión convencionales.

5.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- Realizar la revisión del estado del arte sobre sistemas de transmisión de potencia, revisando artículos en bases de datos científicas reconocidas. **Indicador:** Revisión de artículos en bases de datos científicas reconocidas. **Resultado:** Estado del arte.
- Desarrollar la fase de diseño del concepto del sistema de transmisión, según requisitos de diseño: baja potencia (menor de 746 w), dimensionamiento geométrico y de acoplamiento al banco de transmisión de potencia; con el fin de buscar alternativas de solución. **Indicador:** Fase de desarrollo conceptual según David G. Ullman. **Resultado:** Alternativas de solución.
- Desarrollar la fase de diseño detallado y manufactura del prototipo del sistema de transmisión de acuerdo a la mejor alternativa de solución seleccionada, para proceder al dimensionamiento del sistema con sus respectivos cálculos y planos. **Indicador:** Fase de desarrollo de detalle y manufactura según David G. Ullman. **Resultado:** Cálculos estructurales, planos estandarizados del diseño, y prototipo funcional.

- Caracterizar el prototipo fabricado en función de eficiencia mecánica del sistema, mediante la obtención de datos experimentales en ensayos para comparar la eficiencia mecánica respecto a sistemas de transmisión convencionales. **Indicador:** Comparación de la eficiencia mecánica del sistema respecto a sistemas de transmisión convencionales. **Resultado:** Índice de eficiencia mecánica del sistema.

6. MARCO TEÓRICO

Con este capítulo se busca mostrar los conceptos básicos de todo lo relacionado con sistemas de transmisión de potencia y sus respectivas eficiencias.

Primero se busca aclarar por medio de una introducción la importancia de estos sistemas de transmisión en la historia y su importancia en la actualidad; para ello se hará un recuento de antecedentes para establecer las bases de los avances en esta área de la ingeniería mecánica.

6.1. SISTEMAS DE TRANSMISIÓN DE POTENCIA

Los sistemas de transmisión mecánica son los más usados en la industria actualmente, su principal función es de transmitir e incrementar la potencia para aprovechamiento en sistemas de transmisión de potencia por lo que su mantenimiento (Lubricación principalmente, ajustes y alineación) es importante a la hora de buscar mejorar eficiencia en el sistema. Cada una de sus partes una vez que sufren un desgaste es conveniente cambiar por completo.

La transmisión mecánica es una forma de intercambiar energía gracias a la sucesión de distintos elementos tales como: piñones, cadenas, poleas.

Tipos de transmisión más comunes:

- Cadena
- Cardan

- Engranajes
- Correa y poleas

6.1.1. Transmisión por cadena

Depende de tipo de configuración de paso (sencillo, doble o triple) puede llegar a generar una gran fuerza y altas velocidades, una característica muy relevante es que este tipo de transmisión no asume ningún tipo de alineación paralela o angular.

6.1.2. Transmisión por cardan

Al contrario del anterior tipo de transmisión este si asume una alineación paralela y angular en un grado determinado. Dentro de las desalineaciones encontramos la mixta, la angular y la paralela. Estos tipos de transmisión son utilizados para fuerzas muy grandes y velocidades medias.

6.1.3. Transmisión por engranajes

Existen muchos tipos de engranes, algunos hasta especiales en su forma misma, como en su aplicación. Estos son los más comunes:

- Engrane cilíndrico de dientes rectos
- Engrane cilíndrico de dientes helicoidales
- Engrane cónico de dientes rectos
- Engrane cónico de dientes helicoidales

- Algunos tipos de engranes menos comunes.

6.1.3.1. Engranajes cilíndricos de dientes rectos

Es considerado el engranaje más simple y corriente su protagonismo se puede observar cuando se necesitan bajas velocidades, lo más importante es su rectificando y corregir su tallado, para evitar que se produzca ruido (y este depende de la velocidad de giro).

6.1.3.2. Engranajes helicoidales

Estos tipos de engranajes permite la transmisión por cremallera que permite la transformación de una rotación en un movimiento lineal de adelante hacia atrás.

6.1.3.3. Engranajes espina de pescado

Utilizados para manejar grandes velocidades y mucha fuerza

6.1.4. Transmisión por polea o correa

Una polea es una rueda acanalada que gira entorno a un eje, por el canal pasa una correa o una cuerda que conecta con la carga que se quiere mover.

Las polea móviles se mueven al desplazarse la carga en un sistema de poleas doble una fija y una móvil la longitud de la cuerda debe ser el doble de la distancia que recorre la carga pero el esfuerzo necesario resulta ser la mitad de la carga.

Por otro lado no asume la alineación paralela o angular, cuando la correa y la polea son dentadas no se pierde potencia por desalineación pues la transmisión se mantiene sincronizada. Esta sincronización es más común en las cadenas que al estar incrustado el piñón con los eslabones de la cadena se mantiene la alineación y no se pierde tanta potencia.

6.2. ALTERNATIVAS PRELIMINARES DE PROYECTOS

La metodología con base en la caracterización del proyecto, la información de referencia y las restricciones geométricas definidas, sugiere hasta tres alternativas de solución para el sistema de transmisión de potencia. Las alternativas planteadas dan prioridad a las características que causan un menor impacto en los costos del sistema y a los aspectos que pueden favorecer la eficiencia mecánica, estas alternativas preliminares serán comparadas y evaluadas de acuerdo con el costo global.

Para determinar los proyectos que pueden ser evaluados por la metodología, se han implementado una serie de restricciones para descartar alternativas no viables técnicamente y otras que, aunque viables, no suelen implementarse dadas las tendencias de diseño del contexto técnico o presentan condiciones técnicas atípicas.

A continuación, se muestran las alternativas de soluciones al sistema de transmisión de potencia y luego se considera una alternativa como configuración del proyecto:

6.2.1. Sistema rueda dentada-linterna

Este sistema era utilizado en los molinos de la edad media, para llevar el movimiento producido por motores hidráulicos hasta la muela, y se le considera el predecesor de los sistemas de engranajes. El sistema era construido en madera y consistía en una rueda dentada y la linterna.

La rueda dentada consistía en un disco conformado por dientes cilíndricos situados en posición paralela respecto al propio eje. La linterna era un tambor de barras diseñados para que los dientes de la rueda pudieran ingresar y arrastrarlo en su movimiento.⁹

⁹ **MAYMÓ, D. MARIANO. 1872.** *Manual de mecánica práctica.* Tercera. Barcelona : IMPRENTA DEL HEREDERO DE D . PABLO RIERA, 1872.

Ilustración 1. Sistema de rueda dentada – Interna.



Fuente: Autor.

6.2.2. COLUMBIA CHAINLESS BICYCLE

Estas bicicletas sin cadena comenzaron a comercializarse en 1897 y se hicieron moderadamente populares los siguientes dos años, hubo una pérdida de aproximadamente el 8% de eficiencia respecto a la cadena, en parte debido a las tecnologías de fabricación limitadas en ese momento. ¹⁰

¹⁰ Tietjen, William A. 2007. fusion studios. [En línea] 2007. [Citado el: 5 de Octubre de 2019.] <http://www.fusionstudios.com/hill-climber/index.html>.

Ilustración 2. Columbia Chainless Bicycle.



Fuente: Autor.

6.2.3. The world's most efficient drivetrain

En el estado del arte se encontró un sistema complejo como prototipo, el cual brinda algunos aportes para la investigación de soluciones alternativas mediante un fácil mecanizado, con menor cantidad de piezas y materiales más comunes en el mercado que permitan minimizar costos y ser implementado en cualquier sistema de entrega de potencia en la industria.

Ceramic Speed junto con el departamento de ingeniería mecánica de la universidad de colorado han creado un concepto de transmisión con un 99% de eficiencia mecánica volviéndola en el sistema de transmisión de potencia más eficiente del

mundo, eliminando puntos de fricción y usando rodamientos cerámicos lograron disminuir un 49% de fricción respecto a la cadena. Conlleva una limitación importante en la que solo puede transferir 200-250 W de potencia. ¹¹

Ilustración 3. The world's most efficient drivetrain



Fuente: Autor.

¹¹ *The world's most efficient drivetrain.* CeramicSpeed™. 2018. Denmark : s.n., 2018

7. METODOLOGÍA

Para llevar a cabo el diseño y fabricación del sistema de transmisión de potencia no convencional, se siguió la metodología de diseño según David G. Ullman¹². Donde lo primero a realizar es una fase de ideación; se busca especificar la tarea con ayuda de revisión bibliográfica e investigación de sistemas de transmisión de potencia y sus respectivas eficiencias mecánicas para tener datos base.

La siguiente fase es el diseño del concepto que consiste en plantear posibles soluciones al diseño del sistema de transmisión en base a especificaciones, requisitos y necesidades; parámetros del sitio físico donde se instaló el sistema de entrega de potencia y parámetros del motor como: revoluciones, potencia y torque.

Posteriormente se continuó con la fase de desarrollo avanzado o diseño detallado, donde se realizó los cálculos estructurales, simulación grafica del sistema en un software CAD, planos estandarizados del diseño y fabricación del sistema funcional mediante impresión 3d, que se llevó a cabo en el campus universitario; esto de acuerdo a la mejor alternativa de solución previamente planteada.

El sistema se instaló en el banco de transmisión de potencia para su caracterización en función de la eficiencia mecánica del sistema; por medio de los elementos específicos de algunos laboratorios como tacómetro y torquímetro. Con el torquímetro digital se frenó el motor eléctrico simulando una carga máxima para obtener un torque máximo de entrada. Posteriormente se frenó el sistema de

¹² G. Ullman, David. 2017. *The Mechanical Design Process*. Sexta. s.l. : McGraw Hill, 2017

transmisión acoplado al motor eléctrico para obtener el torque máximo al final del sistema, conociendo el torque, la velocidad angular a la entrada y salida del sistema mediante el uso del tacómetro y la relación de transmisión se procedió a calcular la potencia de entrada y de salida y así la eficiencia mecánica.

7.1. DISEÑO CONCEPTUAL DEL SISTEMA SEGÚN DAVID G. ULLMAN

Esta metodología de diseño propone un sistema que se desarrolla en cuatro fases generales que determinan los resultados de las siguientes etapas, la tabla 1 representa el desarrollo de la metodología de diseño según David G. Ullman¹³

Tabla 2. Modelo de fases de diseño.

FASE	David G. Ullman
Ideación	Establecimiento de la necesidad
	Desarrollo/Planeación de las especificaciones
Desarrollo conceptual y básico	Desarrollo de conceptos
Desarrollo avanzado	Diseño del producto
Lanzamiento	Producción

Fuente: The Mechanical Design Process (2017).

Una vez establecida la fase de ideación, una etapa fundamental en el proceso de diseño que plantea una necesidad que se busca suplir con el producto además de hacer énfasis en ideas o enunciar ciertos aspectos sobre el producto. Con una

¹³ G. Ullman, David. 2017. *The Mechanical Design Process*. Sexta. s.l. : McGraw Hill, 2017

previa planeación de las especificaciones en el anteproyecto este documento continua con la fase de desarrollo conceptual.

La finalidad del diseño conceptual consiste en obtener un esquema con los componentes esenciales del mecanismo, capaz de cubrir las necesidades de un sistema de transmisión de potencia. Para ello, el criterio a seguir es el de minimizar las fuerzas de fricción, pues estas son las que generan la pérdida de eficiencia mecánica en estos sistemas, de manera que cuanta menor fuerzas de fricción mayor será el rendimiento global del mecanismo.

Para la realización del diseño conceptual se partió de la especificación del producto y se encontraron alternativas de solución obtenidas del estado del arte, se filtraron tres alternativas a través de una serie de restricciones consideradas. Las cuales luego de ser evaluadas, condujeron a la selección de la más conveniente no sin antes proponer cambios de algunas partes de estos sistemas debido a que algunas alternativas resultaban ineficientes, muy complejas o costosas.

7.1.1. Restricciones consideradas

- No se consideran productos existentes en el mercado.
- No se consideran sistemas de transmisión neumáticos, hidráulicos o eléctricos.
- Solo se considera el empleo de un solo tipo de sistema de transmisión.
- Solo se consideran proyectos adaptables a una potencia de hasta 746W.
- No se consideran sistemas con eficiencias mecánicas menores al 80%
- Solo se considera el diseño del sistema para la entrega de potencia en un solo elemento.
- No se considera el uso de reductores de velocidad.

La selección de la relación de transmisión no se considera restricción pues se puede usar diferentes configuraciones de tamaños de piñones, coronas u otros elementos para obtener más torque o velocidad, según sea la necesidad.

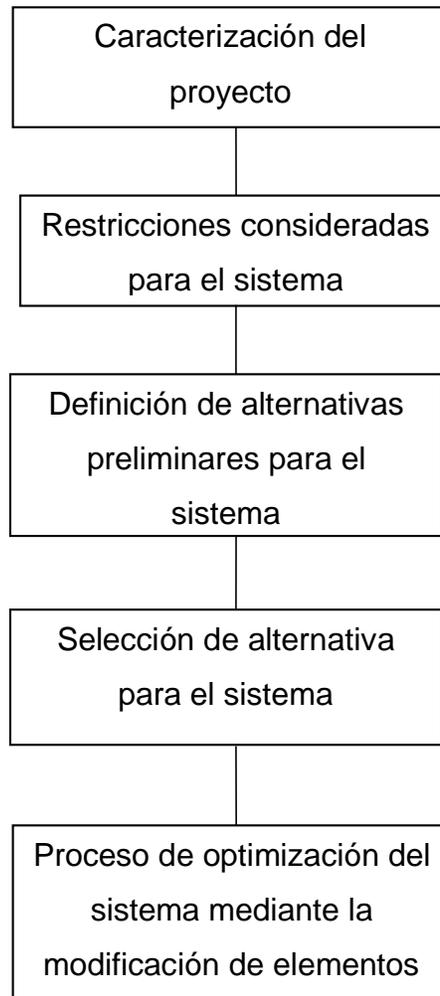
7.1.2. DESCRIPCIÓN DE LA ALTERNATIVA SELECCIONADA

El objetivo principal de la metodología es ofrecer los elementos necesarios para seleccionar la alternativa del sistema adecuada para el proyecto, la selección de la alternativa del sistema considera la información técnica, de confiabilidad y eficiencia mecánica relacionada con las alternativas preliminares y una tentativa información de cotización.

Esta información permite establecer relaciones entre los costos y los parámetros de eficiencia mecánica que junto con los requerimientos y restricciones del proyecto, permiten definir el sistema adecuado para el proyecto.

A continuación se ilustra la secuencia de desarrollo planteada por la metodología:

Ilustración 4. Secuencia de desarrollo de la metodología



Fuente: Autor.

A continuación se describe la solución conceptual seleccionada:

La alternativa de sistema de transmisión de potencia seleccionada es la alternativa presentada por CeramicSpeed que consta principalmente de una flecha que transmite el movimiento entre un piñón y una serie de coronas, para el caso del proyecto la potencia será suministrada por un motor eléctrico (373 W) un piñón se instalará en el eje del motor, mientras que una corona se instalará en otro eje donde

se podrá usar su movimiento para diversas aplicaciones. Este sistema es similar al de cardan en cuanto a que las distancias entre centros pueden ser grandes y más versátiles. Además, presenta una mayor eficiencia, su lubricación es algo engorrosa debido a que se tiene que lubricar periódicamente.

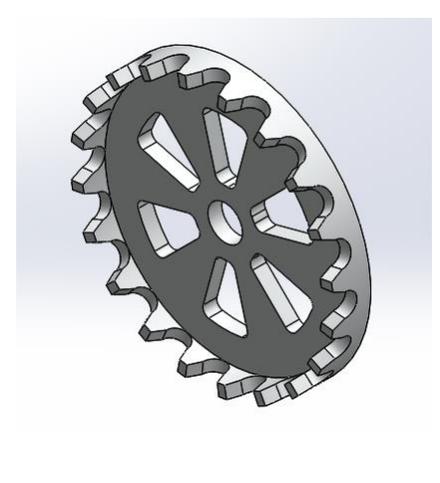
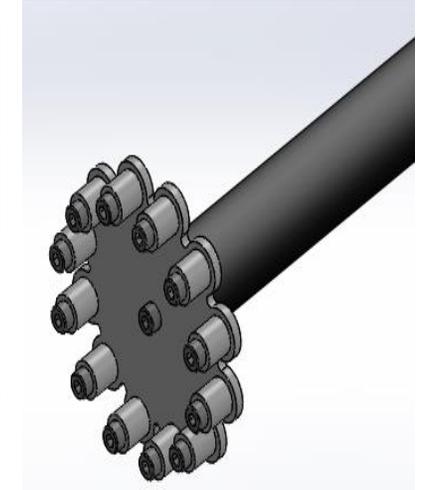
7.1.3. Optimización de la alternativa seleccionada

El sistema seleccionado está fabricado en materiales difícilmente accesibles y que representan un incremento en el costo del proyecto, los dientes del piñón y corona están fabricados en tres ejes axiales, probablemente fabricados en maquinaria CNC, además las ruedas dentadas montadas en la flecha están constituidas por pequeños rodamientos en cerámica, por lo que estos elementos estarán sometidos a cambios.

Algunos de los cambios son los ejes de maquinado del piñón y la corona, reduciéndolos a dos, el reemplazo de las ruedas con rodamientos sobre la flecha a una rueda con bujes y rodillos, además el cambio de material de la flecha de fibra de carbono a algún material más accesible.

En la siguiente tabla se aprecia gráficamente algunos de estos cambios en comparación con la alternativa seleccionada:

Tabla 3. Optimización de la alternativa seleccionada

Sistema de transmisión de potencia	Selección de alternativa	Optimización de alternativa
Piñón o corona		
Rueda dentada		

Fuente: Autor.

7.1.4. Descubrimiento del producto

Este método aplicado generalmente en evaluación de planes de negocio, puede ser aplicado en la selección de proyecto con gran facilidad, se basa en la teoría o fundamentos pre-concebidos.¹⁴

Tabla 4. Matriz DOFA del sistema

Matriz DOFA	
Diseño: Sistema de transmisión de potencia no convencional.	
Fecha: 01 de Noviembre de 2019.	
Tópicos del análisis DOFA: Explorar el potencial del trabajo para diseñar un Sistema de transmisión de potencia no convencional para la implementación en el laboratorio de Diseño de máquinas.	
Fortalezas:	Debilidades:
<ul style="list-style-type: none">• Conocimiento previo acerca del proceso de diseño.• Experiencia adquirida en la elaboración de proyectos.• Conocimiento, manejo y operación del software SOLIDWORKS.• Conocimientos sobre resistencia de materiales.	<ul style="list-style-type: none">• Época del desarrollo del proyecto en receso estudiantil.• Incertidumbre sobre cómo abordar la problemática.

¹⁴ McConkey, D. (1988). Planning in a changing environment. Business Horizons, 31(5), 64-72

Oportunidades:

- Orientación de los profesores encargados.
- Área de trabajo disponible.
- Estado del arte existente.
- Disponibilidad de software para modelamiento.
- Existencia de dispositivos similares en el mercado.

Amenazas:

- Probabilidad de adquirir un componente defectuoso.

Fuente: Autor.

Tabla 5. Análisis Pro-Con.

ANÁLISIS PRO-CON

Diseño: Sistema de transmisión de potencia no convencional.

Fecha: 01 de Noviembre de 2019.

Tópicos del análisis Pro-Con: ¿Tendrá el sistema de transmisión de potencia no convencional la capacidad para desarrollar el producto?

Pros:

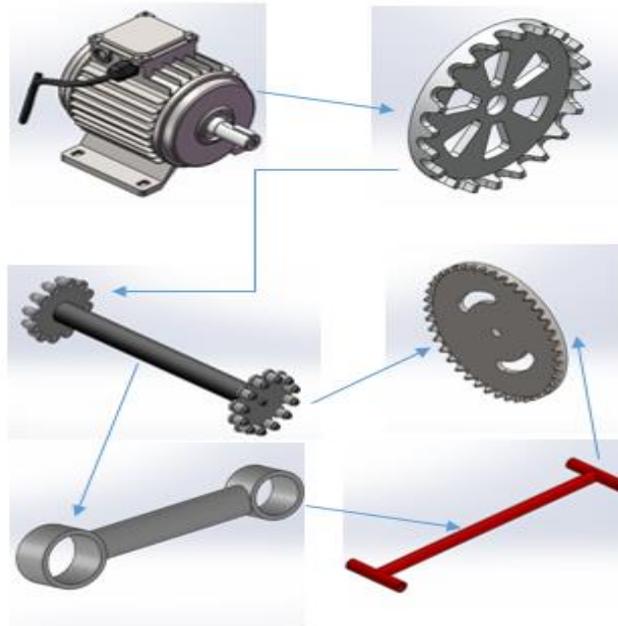
- Interés y motivación para desarrollar el proyecto.
- Manejo del Software SOLIDWORKS.
- Apoyo de académicos con experiencia.
- Conocimientos sobre resistencia de materiales y procesos de diseño.
- Conocimientos en detalle de los productos similares en el mercado.
- Capacidad de experimentar y analizar diseños propuestos.

Contras:

- Época del desarrollo del proyecto en receso estudiantil.
- Dimensionamiento geométrico podría limitar el diseño del sistema.

Fuente: Autor.

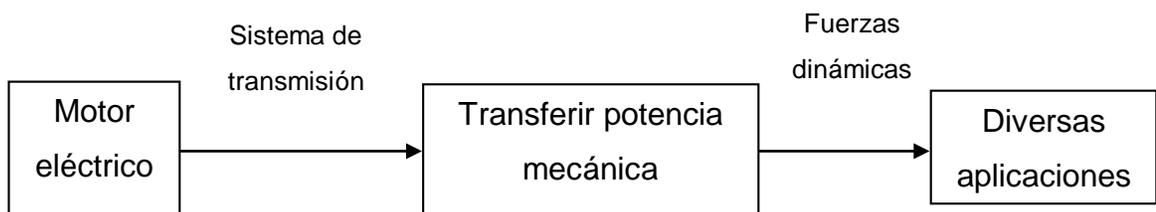
Ilustración 5. Diseño seleccionado



Fuente: Autor.

Función general: "Transferir potencia mecánica"

Ilustración 6. Diagrama función general



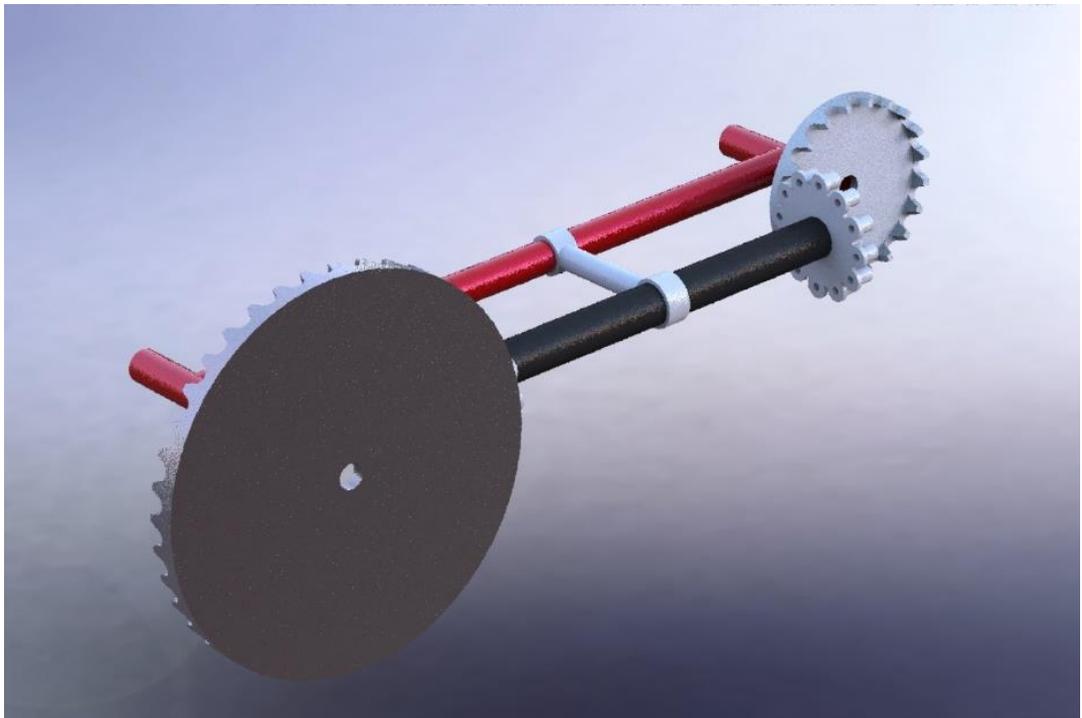
Fuente: Autor.

Sub-funciones:

- Recepcionar potencia del motor eléctrico (Menor a 746W).
- Soportar el peso del sistema sobre el banco.
- Soportar fuerzas dinámicas presentes en el movimiento.
- Transformar la fuerza dinámica en movimiento de rotación.
- Reducir fuerzas de fricción.

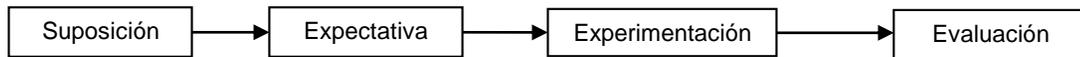
En la figura 5 se ilustra la optimización de la alternativa ensamblada:

Ilustración 7. Alternativa ensamblada



Fuente: Autor.

Ilustración 8. Selección de alternativa



Fuente: Autor.

Luego de obtener una solución para el sistema de transmisión de potencia se tiene la suposición y expectativa de que mejore la eficiencia mecánica de la cadena, esto se comprobará fabricando el sistema para someterlo a pruebas antes de la respectiva evaluación.

A continuación se presenta un método de ingeniería inversa para entender cómo trabaja el sistema, para esto se examina la interfaz con otros objetos, se remueven los componentes para un estudio más detallado y se examina el flujo de energía o información.

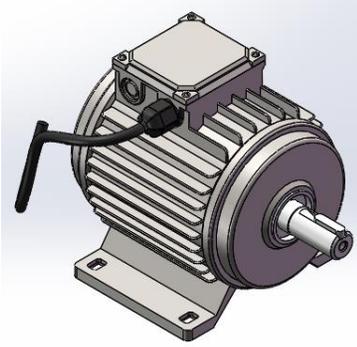
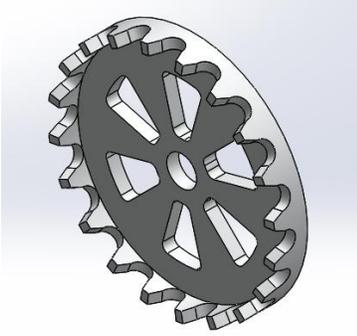
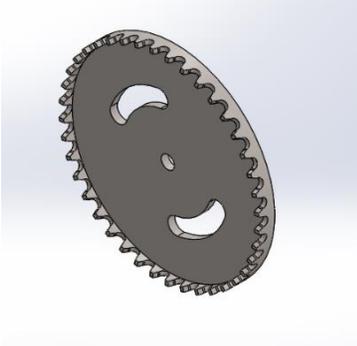
Ilustración 9. Ingeniería Inversa aplicada en el análisis de un sistema de transmisión

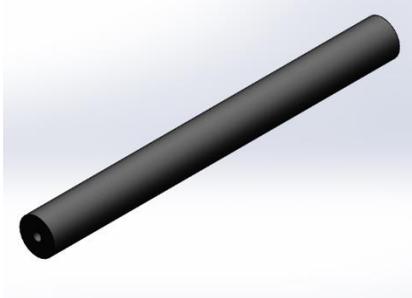
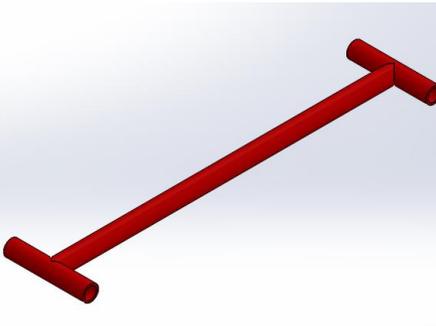
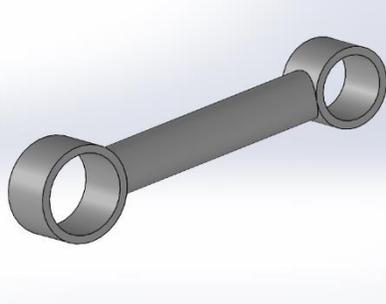
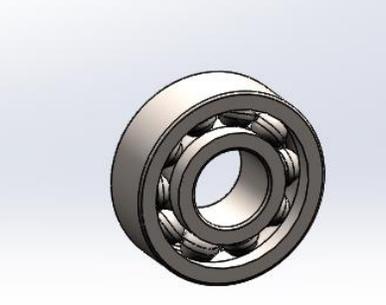
INTERFAZ

Producto descompuesto: Sistema de transmisión de potencia mecánico.

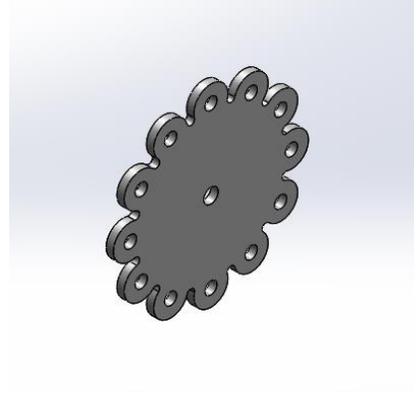
Descripción: Explorar el potencial del trabajo para diseñar un sistema de transmisión de potencia no convencional para la implementación en el laboratorio de Diseño de máquinas.

Como funciona: El sistema recibe la potencia del motor eléctrico, un piñón acoplado a su eje hace girar el sub-ensamblaje de la flecha(Figura 4) que trasmite el movimiento a la corona y por ultimo al eje donde se requiere la potencia.

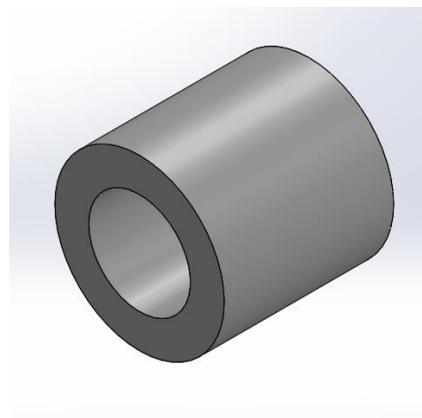
Parte	Nombre de la parte	Parte de la interfaz	Flujo de energía, información	de Imagen
1	Motor eléctrico	Corriente eléctrica- Usuario- Sistema	Encargado de suministrar la potencia al sistema(Menor a 746W)	
2	Piñón	Motor eléctrico- Rodillos	Transmisión de potencia mecánica	
3	Corona	Bujes- Eje receptor de potencia	Transmisión de potencia mecánica	

4	Flecha	Tornillo- Placa unión	de Trasmisión de torque	
5	Estructura	Base-Brazo	Brinda soporte a los brazos	
6	Brazo	Estructura- Flecha	Soporta el peso del ensamble de la flecha	
7	Rodamient os	Flecha- Brazo	Enlace móvil entre flecha y brazo	

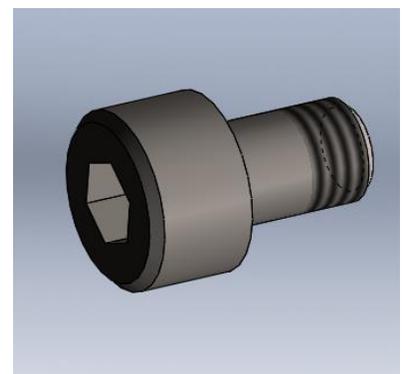
8	Placa de unión	Tornillos- Rodamiento s- Flecha	Placa de sujeción de los rodillos
---	----------------	---------------------------------	-----------------------------------



9	Rodillos	Tornillos- Placa de unión- Piñón- Corona	Están en contacto con la corona y el piñón
---	----------	--	--

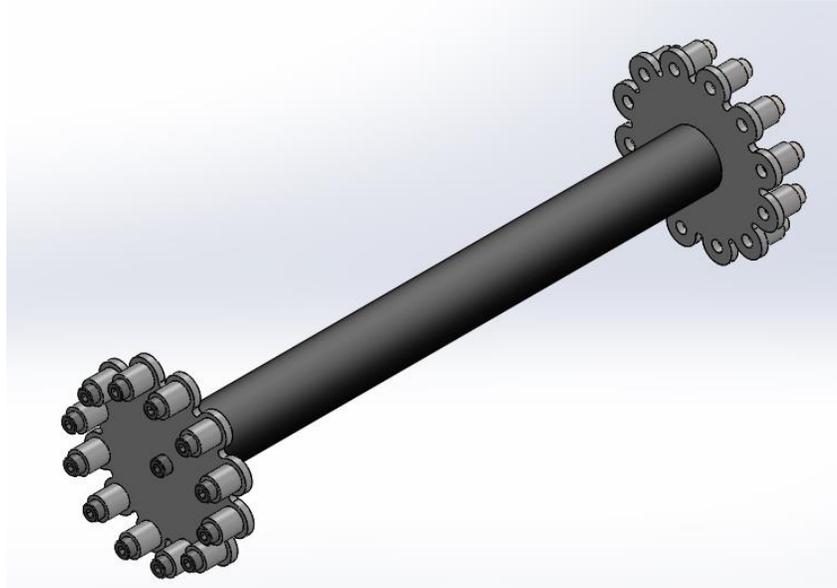


10	Tornillos	Rodillos- Placa de unión	Permiten el ajuste de los rodillos con la placa de unión
----	-----------	--------------------------	--



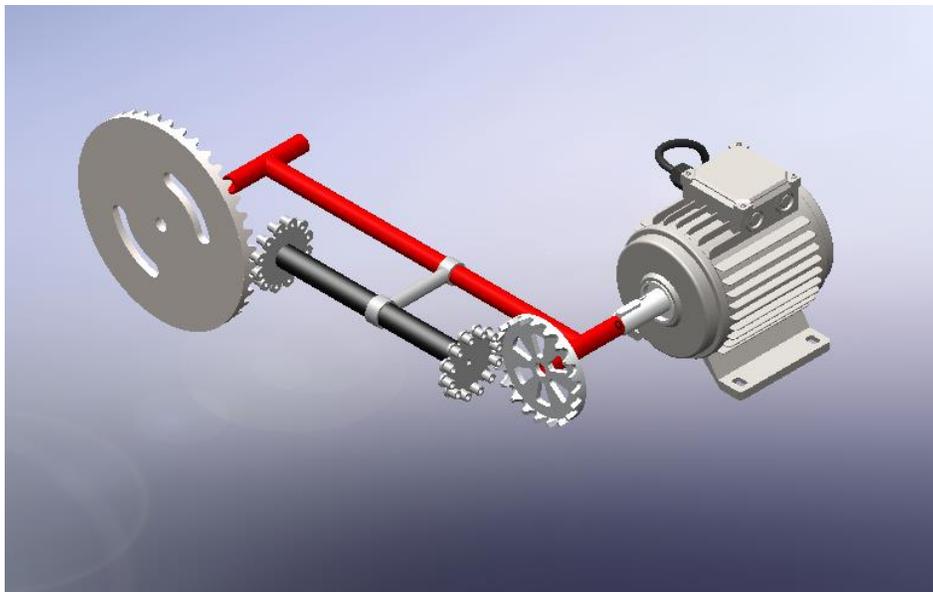
Fuente: Autor.

Ilustración 10. Sub-ensamblaje de la flecha



Fuente: Autor.

Ilustración 11. Ensamblaje del sistema de transmisión de potencia



Fuente: Autor.

7.1.5. Especificaciones de ingeniería para cada requerimiento

- **Perfecta alineación de las ruedas dentadas con el eje conductor.**
Flecha perpendicular al eje del motor.
- **Fácil conexión del piñón con el motor.**
Pasos para realizar la instalación.
- **Fácil montaje del sistema en el banco.**
Permitir intercambiar sistemas de transmisión en el banco.
- **Garantizar rotación horaria y anti horaria.**
Permitir ambos sentidos de giro para futuras aplicaciones.
- **Minimizar fuerza de rozamiento.**
Alta eficiencia mecánica.
- **Tamaño limitado al banco.**
Largo del banco.
Ancho del banco.
- **Fácil operación.**
Pasos para realizar posible práctica en el laboratorio.

7.1.6. Diseño de engranajes

Este sistema de engranajes transmite la potencia mecánica a las ruedas dentadas por parte de piezas inmóviles lo que evita deslizamientos, se partió de la idea de recrear los engranajes de Ceramic Speed Driven¹⁵ disminuyendo sus planos de manufactura de tres a dos, dejando una especie de engranaje con dientes paralelos al eje.

Al ser una sección circular de 360 grados se usó algunas de las ecuaciones para el diseño de engranajes rectos. Se parte de parámetros como un diámetro de 56 mm y un número de dientes de 10. Su ajuste se realizó a través de tornillos prisioneros.

$$Z=10$$

$$\text{Diámetro externo} = 56 \text{ mm}$$

$$\text{Paso circular} = p = \frac{\pi * d}{z} = \frac{\pi * 56}{10} = 17.6 \text{ mm}$$

$$\text{Paso circular} = \pi * m$$

$$\text{Modulo} = m = \frac{17,6}{\pi} = 5.6 \text{ mm}$$

¹⁵ *The world's most efficient drivetrain. CeramicSpeed™. 2018. Denmark : s.n., 2018.*

$$\text{Pie diente} = 1,250 * m = 1,25 * 5.6 = 7 \text{ mm}$$

$$\text{Cabeza diente} = m = 5,6 \text{ mm}$$

$$\text{Altura del diente} = h = 2.25 * m = 12.6 \text{ mm}$$

$$\text{Espesor diente} = e = \frac{19p}{40} = 8.36 \text{ mm}$$

$$\text{Ancho hueco diente} = w = \frac{19p}{40} = 9,2 \text{ mm}$$

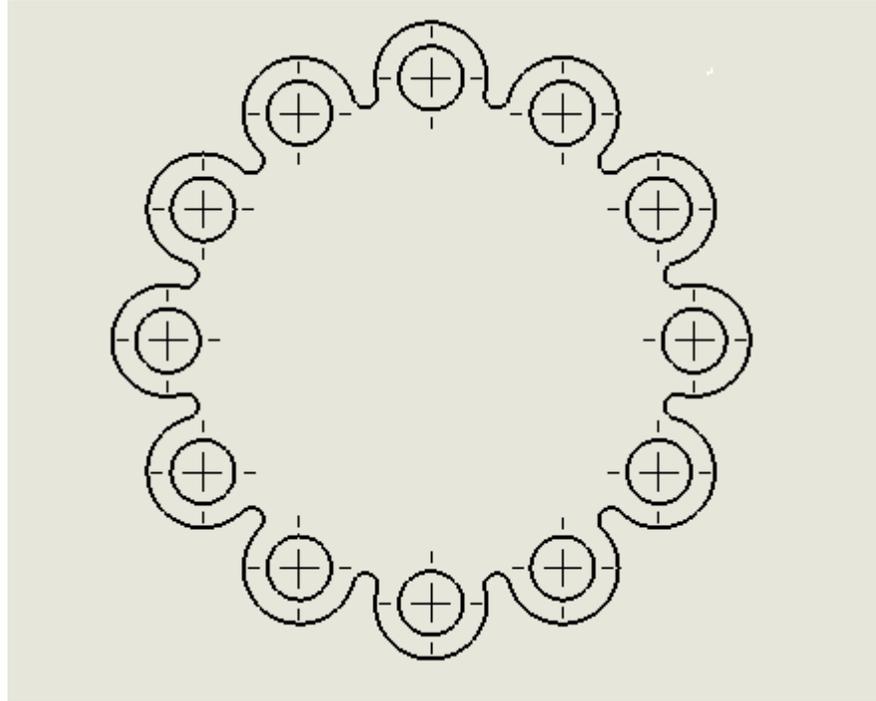
7.1.7. Diseño de rueda dentada

El diseño de la rueda dentada comenzó con una base con una serie de cilindros ubicados con el mismo paso y módulo de los engranajes, se decidió calcular el diámetro mínimo de estos si llegaran a fallar por la fuerza cortante a la que están expuestos.

El torque máximo que deben soportar individualmente es el torque de arranque del motor eléctrico transportado a la distancia en la que están ubicados los cilindros.

Para no alterar la relación de transmisión se decidió dejar la misma cantidad de cilindros en un diámetro establecido por parámetros de espacio en el banco. Su ajuste se realizó a través de tornillos prisioneros.

Ilustración 12. Rueda dentada



Fuente: Autor.

T arranque motor=2.9Nm

$$T=F*d ; F = \frac{T}{d}$$

$$\frac{2.9}{0.025} = 232N$$

Torque en los cilindros= 232*0.015=3.48Nm

$$\tau=0.4*Sy$$

$$S_y(\text{PLA}) = 9000\text{psi} = 62.05 \text{ Mpa}^{16}$$

$$\tau_{\text{max}} = 24.82 \text{ Mpa}$$

$$\eta = \frac{\tau_{\text{perm}}}{\tau_{\text{diseño}}}$$

$$\tau_{\text{diseño}} = \frac{24.82}{2} = 12.41 \text{ Mpa}$$

$$\tau = \frac{F}{A}; A = \frac{F}{\tau}$$

$$A = \frac{232 \text{ N}}{12.41 \text{ Mpa}} = 1.87 * 10^{-5} \text{ m}^2$$

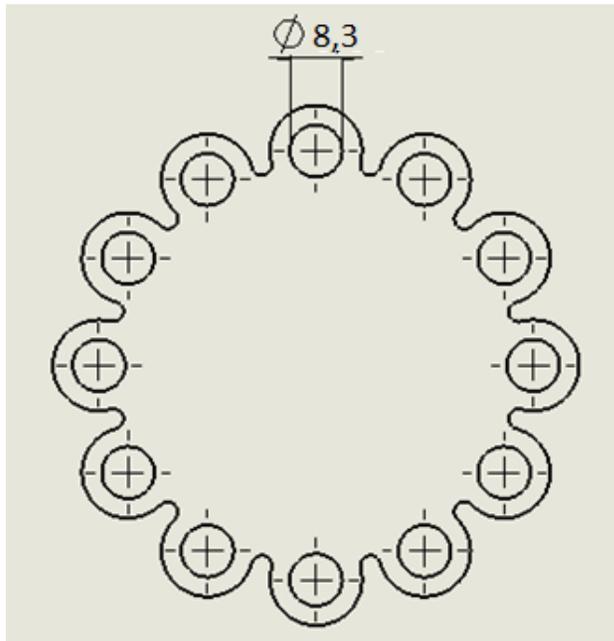
$$A = \frac{D^2 \pi}{4}; D = \sqrt{\frac{4 * A}{\pi}}$$

$$D = \sqrt{\frac{4 * (1.87 * 10^{-5})}{\pi}} = 4.87 * 10^{-3} \text{ m} = 4.87 \text{ mm}$$

¹⁶ UL®. PROSPECTOR®. [En línea] [Citado el: 15 de 01 de 2020.]
<https://plastics.ulprospector.com/es/generics/34/c/t/acido-polilactico-pla-properties-processing>.

El diámetro mínimo que deberían tener los cilindros con un factor de seguridad de dos es de aproximadamente 4.9 mm, teniendo en cuenta que los engranajes ya se diseñaron con una medida para que ensamble con los cilindros de 8,3 mm, y el costo de material es mínimo, se decidió dejar los cilindros de 8,3 mm.

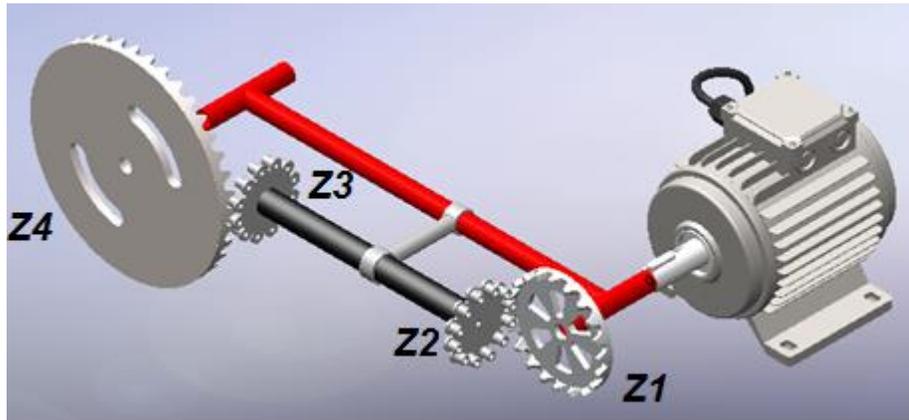
Ilustración 13. Diseño rueda dentada



Fuente: Autor.

7.1.8. Relación de transmisión

Ilustración 14. Relación de transmisión



Fuente: Autor.

La relación de transmisión en el sistema funciona igual que para un sistema por engranajes, que para la aplicación específica es reductora o 1:2 para corroborar esto y simplificar toma de datos, la siguiente ecuación describe el comportamiento:

$$i = \frac{z_1 * z_3}{z_2 * z_4}$$

$$i = \frac{10 * 12}{12 * 20} = \frac{1}{2}$$

Esto quiere decir que por cada revolución en el eje de salida, el eje de entrada tendrá que dar el doble de revoluciones. Si el motor gira a 1600 rpm, el eje de salida girara a 800 rpm.

7.2. DISEÑO AVANZADO DEL SISTEMA SEGÚN DAVID G. ULLMAN

David G. Ullman propone una metodología de diseño que se desenvuelve en cuatro fases generales¹⁷. Una vez desarrollada la fase de desarrollo conceptual, Ullman propone una fase de desarrollo avanzado en el que se toma en cuenta el conjunto ensamblado de piezas así como los materiales, formas y dimensiones de cada elemento con lo que se espera obtener una combinación óptima además de planos detallados del sistema.

Tabla 6. Modelo de fases de diseño

FASE	David G. Ullman
Ideación	Establecimiento de la necesidad Desarrollo/Planeación de las especificaciones
Desarrollo conceptual y básico	Desarrollo de conceptos
Desarrollo avanzado	Diseño del producto
Lanzamiento	Producción

Fuente: The Mechanical Design Process (2017).

¹⁷ G. Ullman, David. 2017. *The Mechanical Design Process*. Sexta. s.l. : McGraw Hill, 2017

En esta etapa se tiene en cuenta además de los aspectos ya mencionados, la funcionalidad, facilidad de manufactura, y costo de su futura construcción.

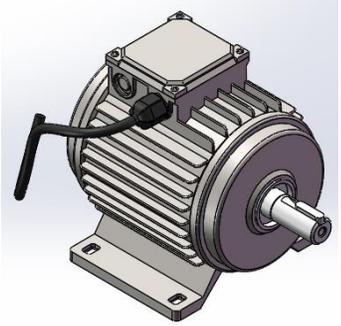
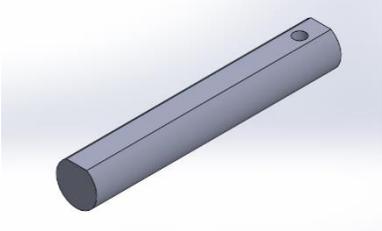
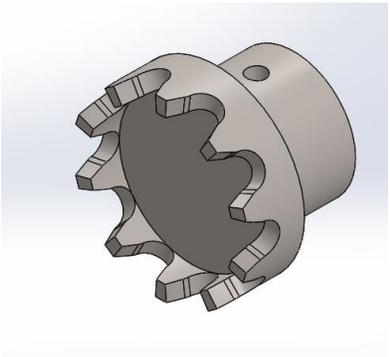
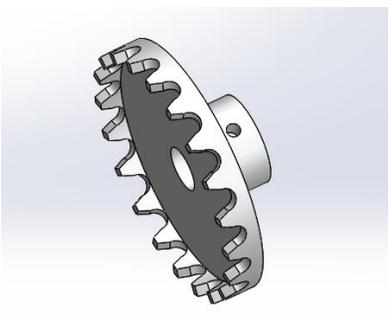
Usando una metodología de ingeniería inversa, se puso a prueba el diseño conceptual al examinar el sistema completo removiendo cada uno de sus componentes para realizar un estudio detallado¹⁸. Teniendo en cuenta parámetros del banco donde se instalará el sistema se tuvo que modificar el diseño conceptual generando una nueva interfaz del sistema junto con algunos elementos eliminados y otros que se optimizaron como se observa a lo largo del presente documento.

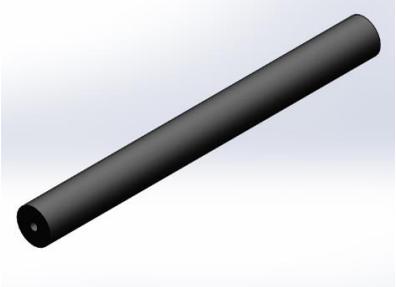
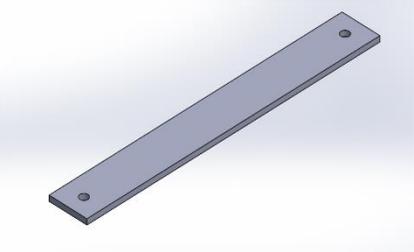
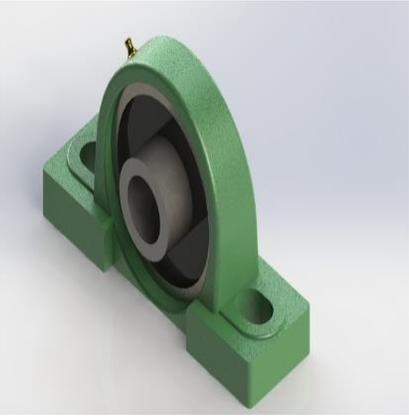
En la tabla 2 se presenta la nueva interfaz del sistema de transmisión junto con información de cada componente:

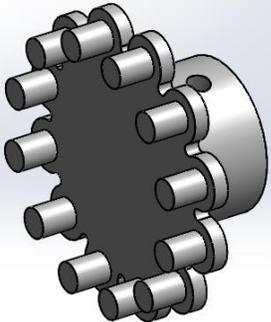
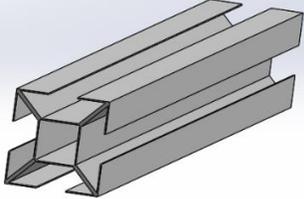
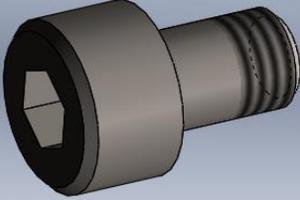
Tabla 7. Ingeniería Inversa aplicada en el análisis de un sistema de transmisión

INTERFAZ
Producto descompuesto: Sistema de transmisión de potencia mecánico.
Descripción: Explorar el potencial del trabajo para diseñar un sistema de transmisión de potencia no convencional para la implementación en el laboratorio de Diseño de máquinas.
Como funciona: El sistema recibe la potencia del motor eléctrico, un piñón acoplado a su eje hace girar el sub-ensamblaje de la flecha(Figura 4) que trasmite el movimiento a la corona y por ultimo al eje donde se requiere la potencia.

¹⁸ McConkey, D. (1988). Planning in a changing environment. Business Horizons, 31(5), 64-72

Parte	Nombre de la parte	Parte de la interfaz	Flujo de energía, información	Imagen
1	Motor eléctrico	Corriente eléctrica- Usuario- Sistema	Encargado de suministrar la potencia al sistema (0,5Hp)	
2	Acople motor	Motor eléctrico - Piñón	Transmisión de potencia mecánica	
3	Piñón	Acople motor - Placa de unión	Transmisión de potencia mecánica	
4	Corona	Bujes- Eje receptor de potencia	Transmisión de potencia mecánica	

5	Flecha	Tornillo prisionero- Placa de unión	Trasmisión de torque	
6	Estructura	Riel- Chumacera a	Brinda soporte a la chumacera	
7	Chumacera	Riel- Flecha	Soporta el peso del ensamble de la flecha	

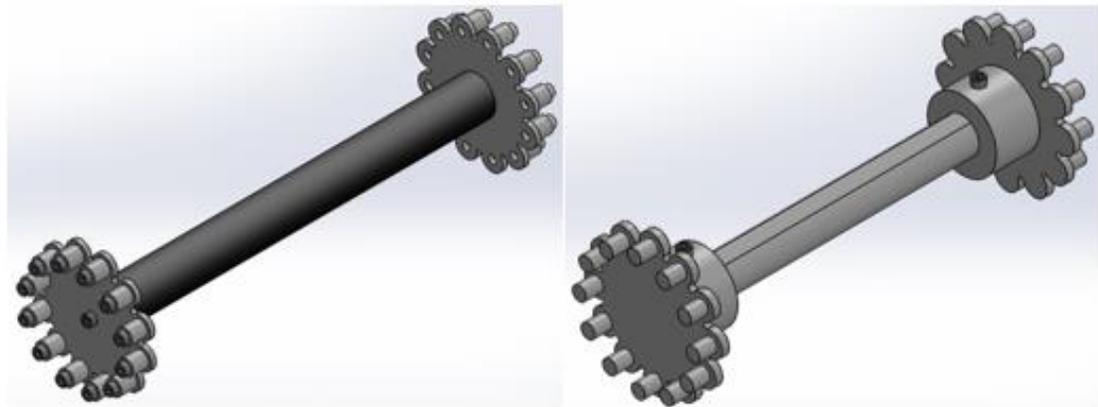
8	Rodamientos	Flecha-Chumacera	Enlace móvil entre flecha y chumacera	
9	Placa de unión	Piñón-Corona-Flecha	Placa de sujeción de los rodillos	
10	Rieles	Tornillos-Placa de unión-Piñón-Corona	Están en contacto con la corona y el piñón	
11	Tornillos prisioneros	Flecha-Placa de unión-Piñón-Corona	Permiten el ajuste de acoples con flechas	

Fuente: Autor.

7.2.1. Optimización de la solución conceptual

El primer cambio que se realizó fue al sub-ensamblaje de la flecha donde la sujeción de la placa de unión a la flecha con un solo tornillo no era la mejor opción al producir posibles deslizamientos, se rediseñó por una placa con acople hembra para insertar en la flecha junto con un tornillo prisionero. Además se cambiaron los 12 rodillos junto con los doce tornillos por bujes solidos impresos sólidamente junto con la pieza, esto con el fin de disminuir el peso total de este elemento.

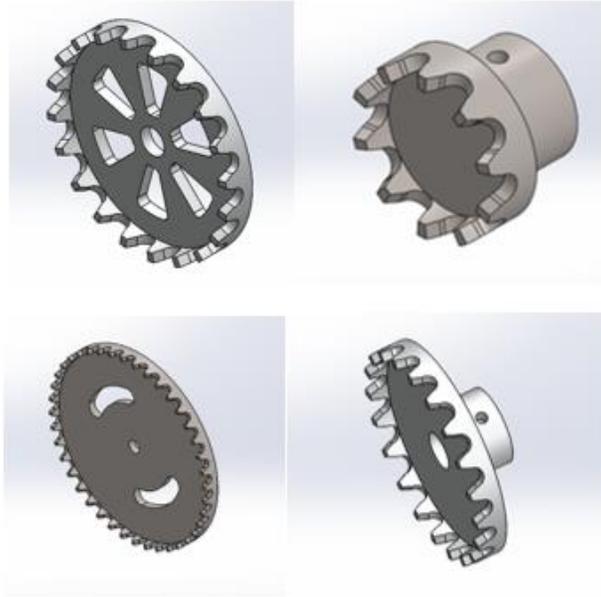
Ilustración 15. Cambios sub-ensamblaje flecha



Fuente: Autor.

Otro cambio realizado es el sistema de sujeción del piñón y corona a sus respectivos ejes, donde en la etapa de diseño conceptual no se tuvo en cuenta, en esta etapa se optó por usar el mismo sistema de acople hembra con tornillo prisionero de las placas de unión.

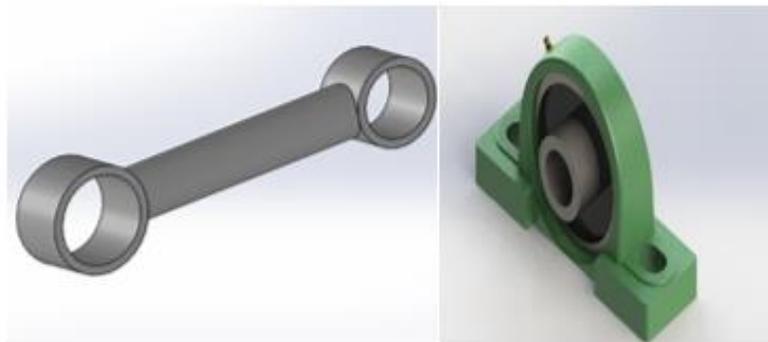
Ilustración 16. Cambios en piñones



Fuente: Autor.

Se cambia el brazo de soporte para rodamiento por chumaceras tipo puente p204 encontradas en el laboratorio, ver ilustracion 17.

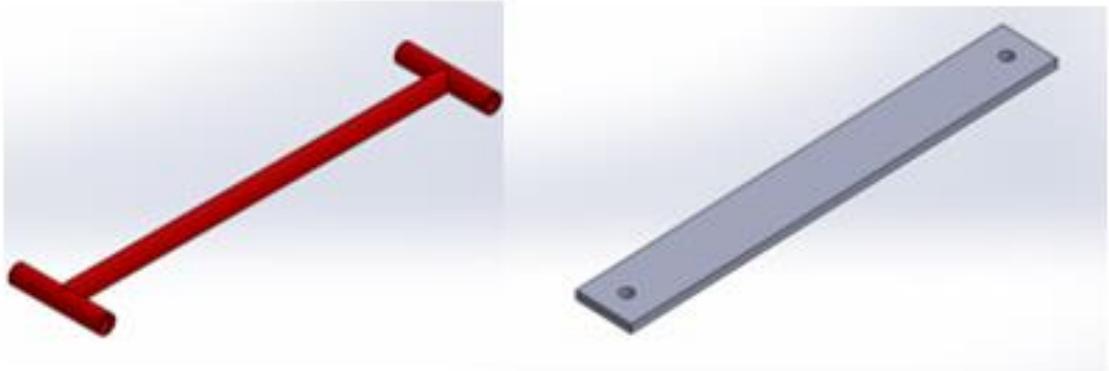
Ilustración 17. Cambio en soporte de rodamiento - Chumacera



Fuente: Autor.

Realizado el cambio de chumacera, tambien se realiza modificacion a la estructura que soportaba el brazo de soporte de rodamiento, asi:

Ilustración 18. Cambio soporte estructura



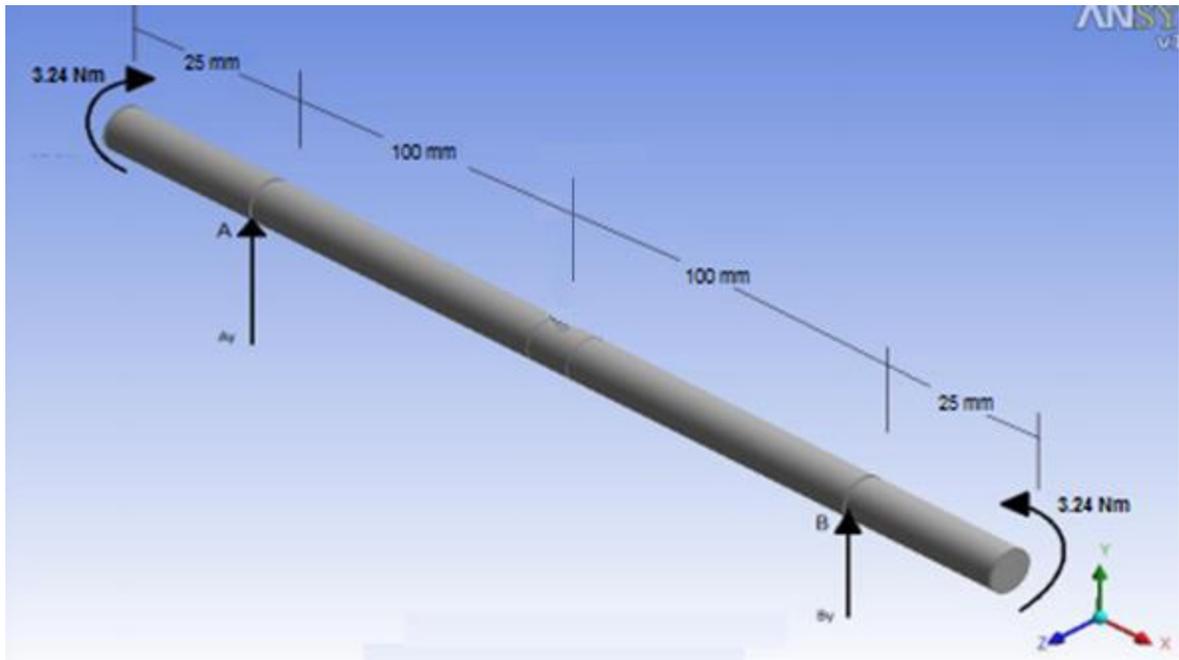
Fuente: Autor.

7.2.2. Diseño de la flecha

Potencia=0.5Hp= 373 W

$\omega = 1600 \text{ rpm}$

Ilustración 19. Diseño flecha



Fuente: Autor.

$$M_{\text{máx}}=0$$

$$T_{\text{máx}}=\text{Torque arranque motor}= 2.9\text{Nm}$$

Teniendo momento torsor y flexionante se calcula el diámetro mínimo de la flecha con la Teoría de la Energía de Distorsión:

$$d = \left(\left(\frac{32ns}{\pi S_y} \right) * \sqrt{M^2 + \frac{3}{4} * T^2} \right)^{\frac{1}{3}}$$

Usando un factor de seguridad de 2:

$$d = \left(\left(\frac{32 * 2}{\pi * 206 * 10^6} \right) * \sqrt{0^2 + \frac{3}{4} * 2.9^2} \right)^{\frac{1}{3}}$$

$$d = 6.28 * 10^{-3} m \approx 6.3 mm$$

El diámetro mínimo requerido para la flecha debe ser de 6.3 mm.

7.2.3. Diseño soportes

Para el diseño de los soportes se usó una lamina de hierro comercialmente accesible de 3.5mm de grosor, se procede a hacer el calculo de deflexion de la viga de seccion rectangular.

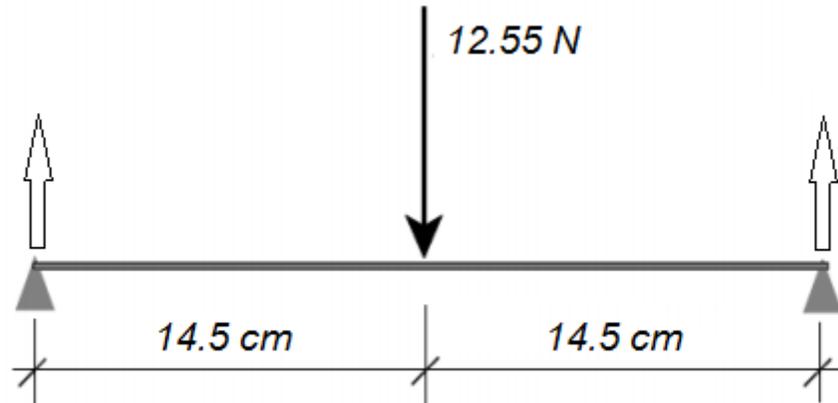
La viga tiene que soportar unos pesos en su centro geometrico de:

Peso flecha: $656/2 = 328g$

Peso viga = 274g

Peso chumacera=677.5g

Ilustración 20. Cálculo soporte

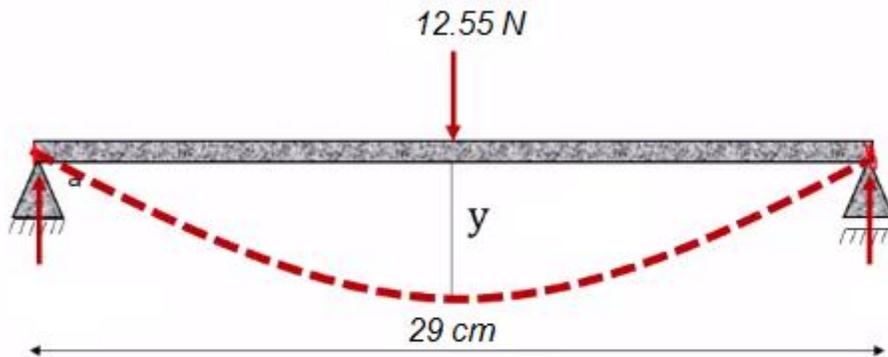


Fuente: Autor

$$I = \frac{bh^3}{12} = \frac{0.29 * (0.0035)^3}{12} = 1.036 * 10^{-9} m^4$$

Ehierro forjado=190000 Mpa

Ilustración 21. Deflexión soporte



Fuente: Autor.

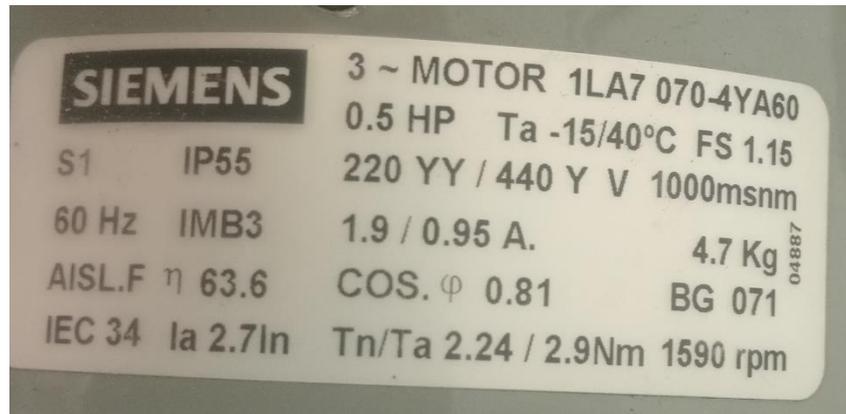
$$y = \frac{Pl^3}{48EI} = \frac{12.55 * 0.029^3}{48 * 1.9 * 10^{11} * 1.036 * 10^{-9}} = 3.24 * 10^{-5} \text{ m} = 0.0324 \text{ mm}$$

La viga se deflexionará 0.0324mm, lo cual es mínimo y aceptable para la aplicación en concreto.

7.2.4. Parámetros del banco de pruebas

Una vez identificado el motor eléctrico a usar como entrega de potencia para el sistema de transmisión no convencional, en su placa de características se rescata la potencia de 0.5 Hp (373W) y su régimen de revoluciones de 1590 rpm, dejando de lado las características eléctricas no indispensables para el diseño del sistema.

Ilustración 22. Placa características motor trifásico



Fuente: Autor.

Ilustración 23. Vista motor eléctrico



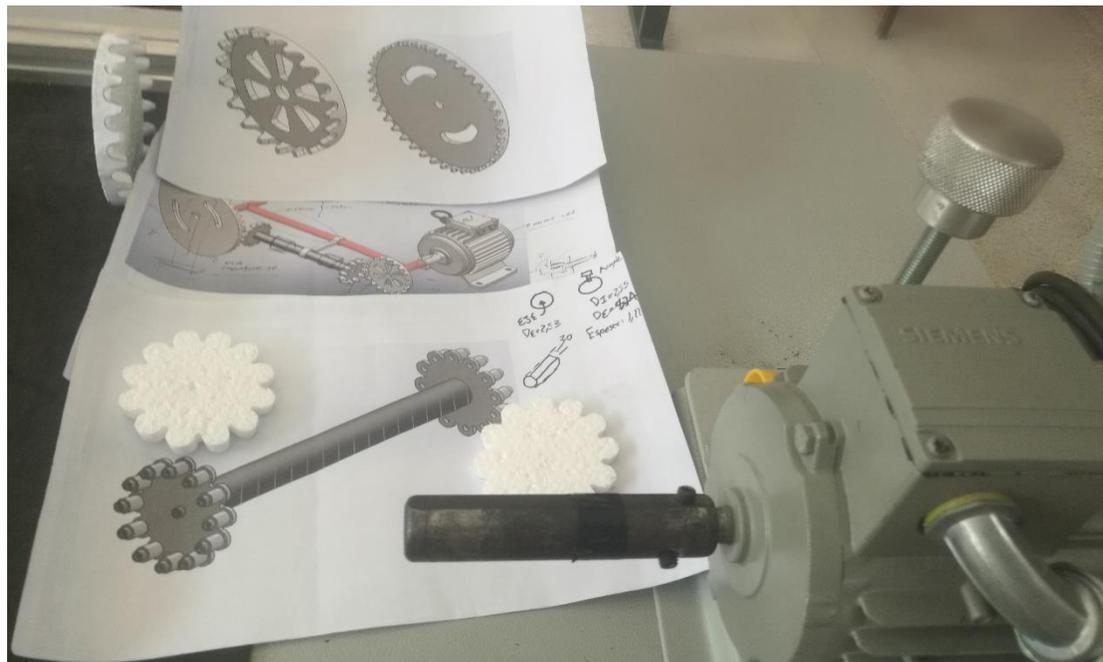
Fuente: Autor.

El banco de pruebas presenta unas limitaciones de espacio las que se fijan como parámetros para cumplir el propósito de fácil montaje y desmontaje del sistema de transmisión.

7.2.5. Montaje del sistema de transmisión

Una vez establecidos los parámetros del banco de pruebas, se procedió a realizar tentativos montajes visualizando el sistema a través de figuras y piezas hechas a escala 1:1 de algunos componentes del sistema en polietileno expandido (icopor) con fines de una mejor percepción.

Ilustración 24. Planeación de montaje experimental



Fuente: Autor.

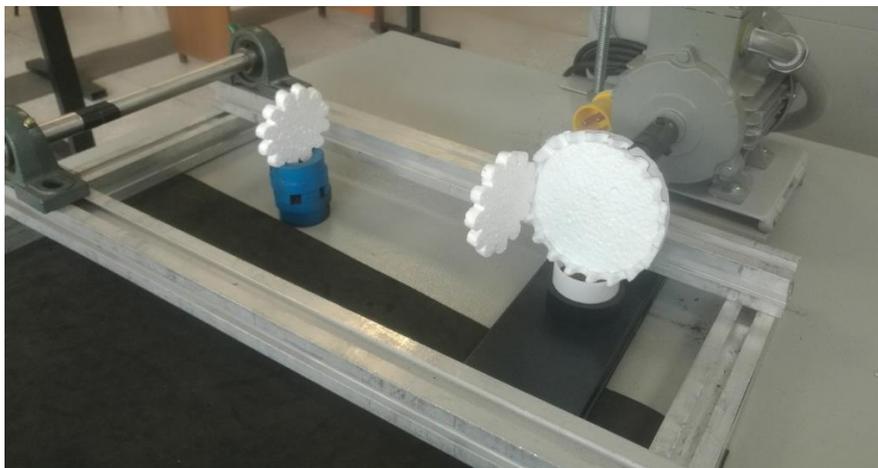
Ilustración 25. Montaje tentativo piñón



Fuente: Autor.

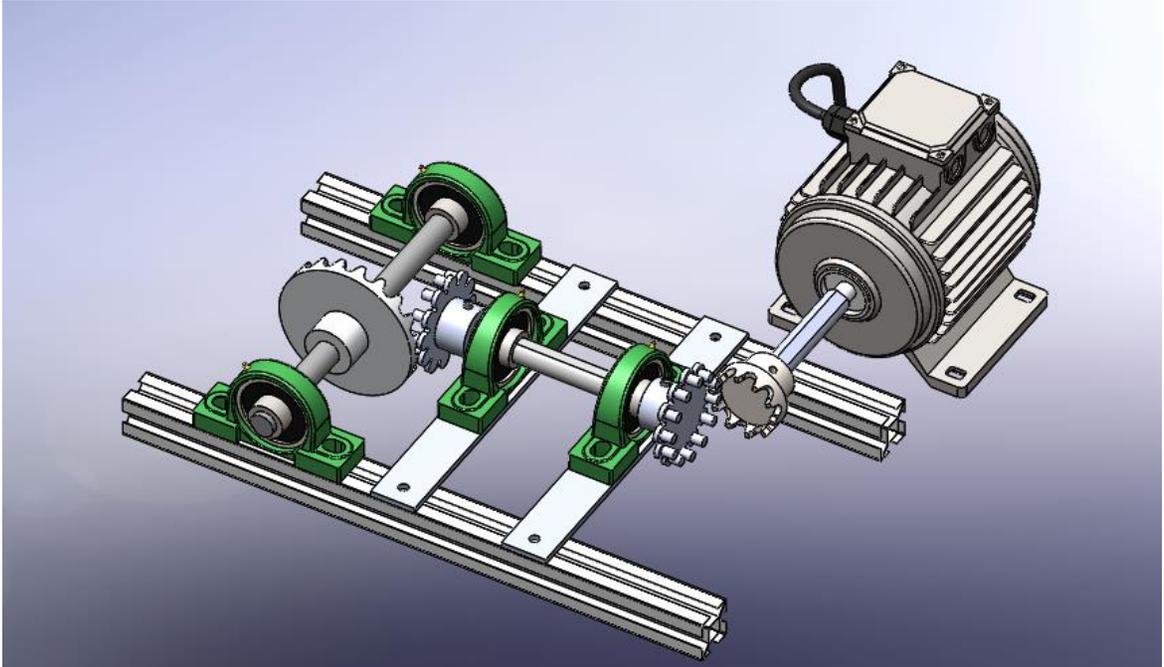
En la ilustración 28 se concluye una visualización de lo que podría ser la instalación del sistema en el banco de pruebas, usando algunos materiales propios del laboratorio y externos al diseño del sistema de transmisión como: rieles, chumaceras y un eje.

Ilustración 26. Montaje tentativo



Fuente: Autor.

Ilustración 27. Ensamblaje gráfico del sistema de transmisión de potencia

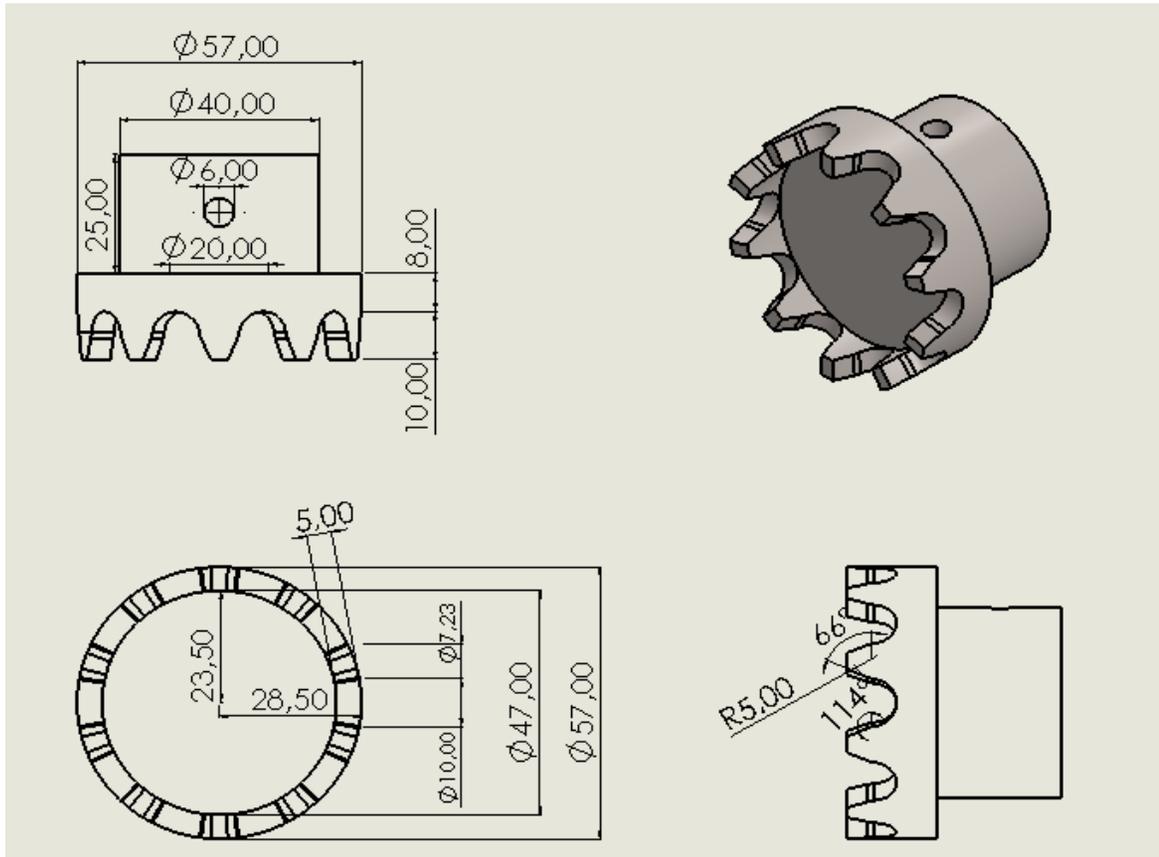


Fuente: Autor.

Una vez visualizado un posible montaje experimental y luego de haber tomado medidas de todos los posibles componentes y dimensiones del banco, el siguiente paso era diseñar y modificar piezas del diseño conceptual para realizar una simulación grafica que se realizó en el software SOLIDWORKS.

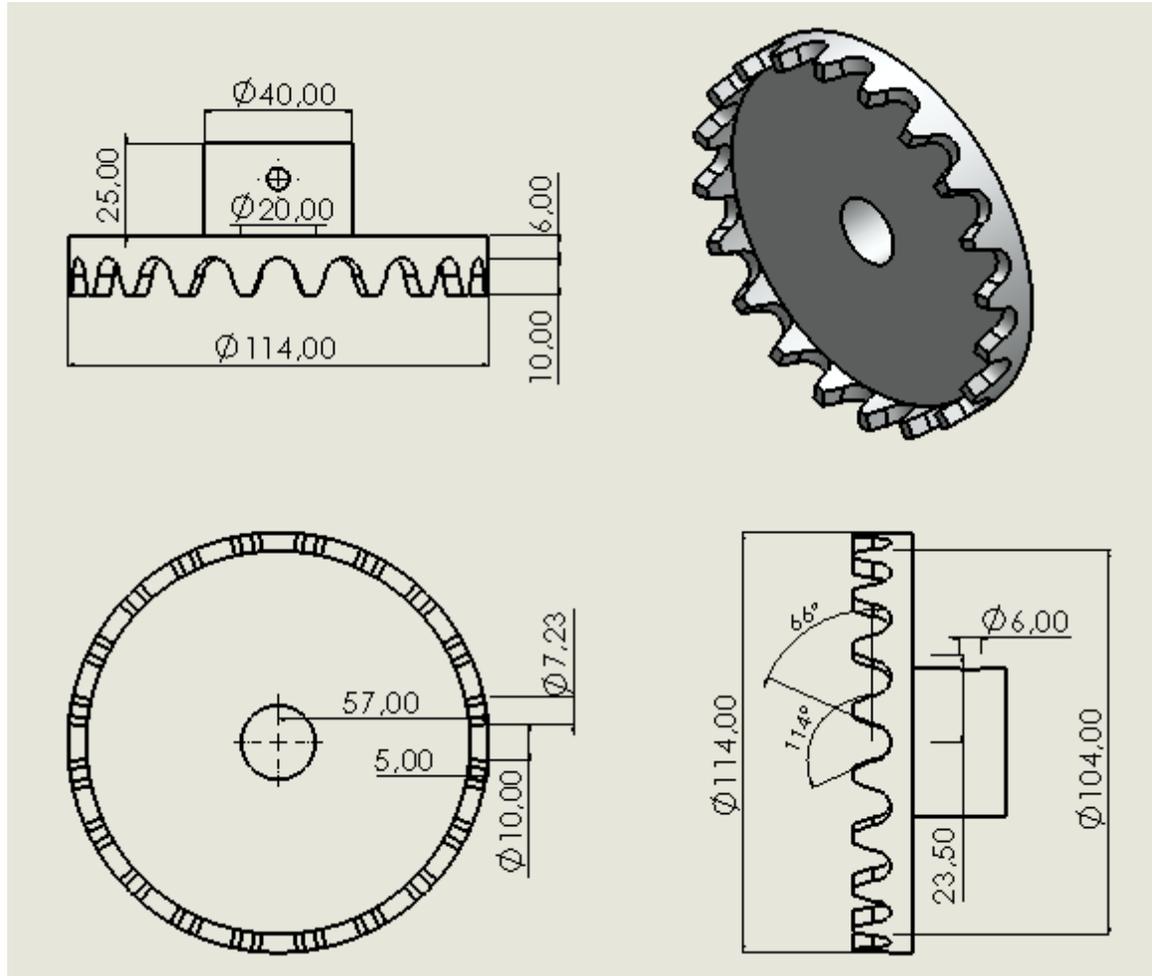
7.2.6. Planos de componentes

Ilustración 28. Plano piñón 10T



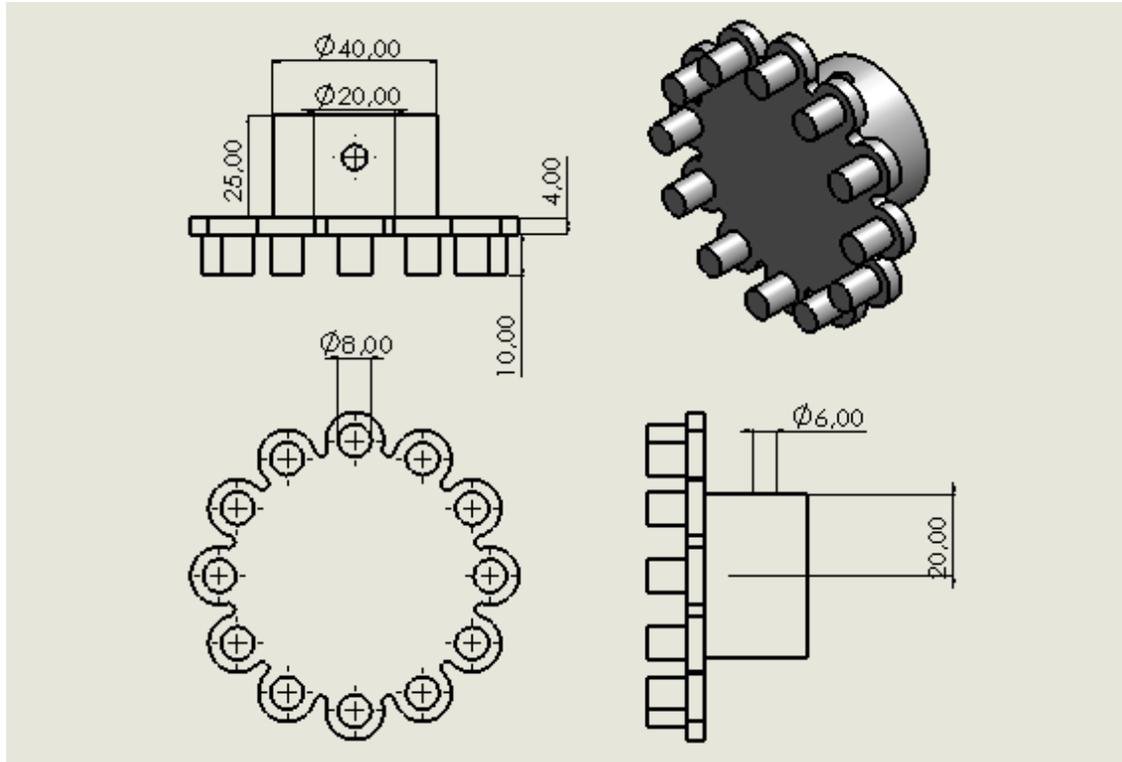
Fuente: Autor.

Ilustración 29. Plano corona 20T



Fuente: Autor.

Ilustración 30. . Plano rueda dentada 12T

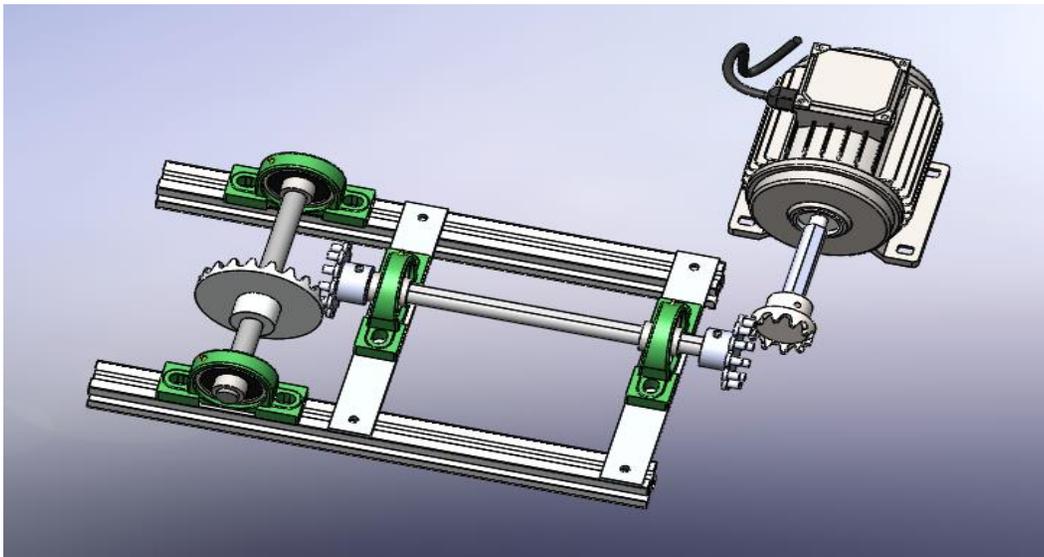


Fuente: Autor.

7.2.7. Variaciones del sistema

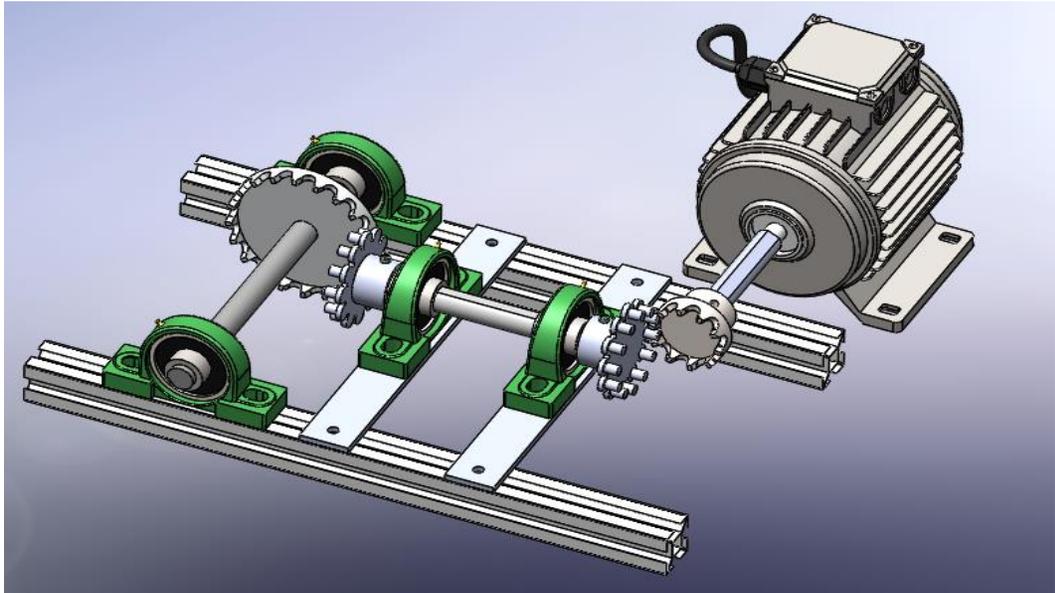
A continuación se muestran algunas figuras extraídas del software SOLIDWORKS, pensando en algunas variaciones que podría tener el sistema:

Ilustración 31. Mayor distancia entre centros



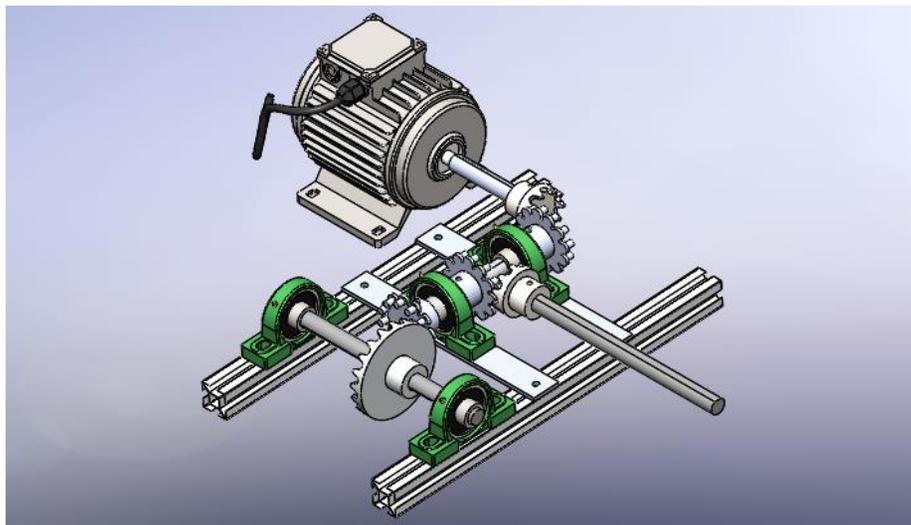
Fuente: Autor.

Ilustración 32. Cambio de sentido de giro



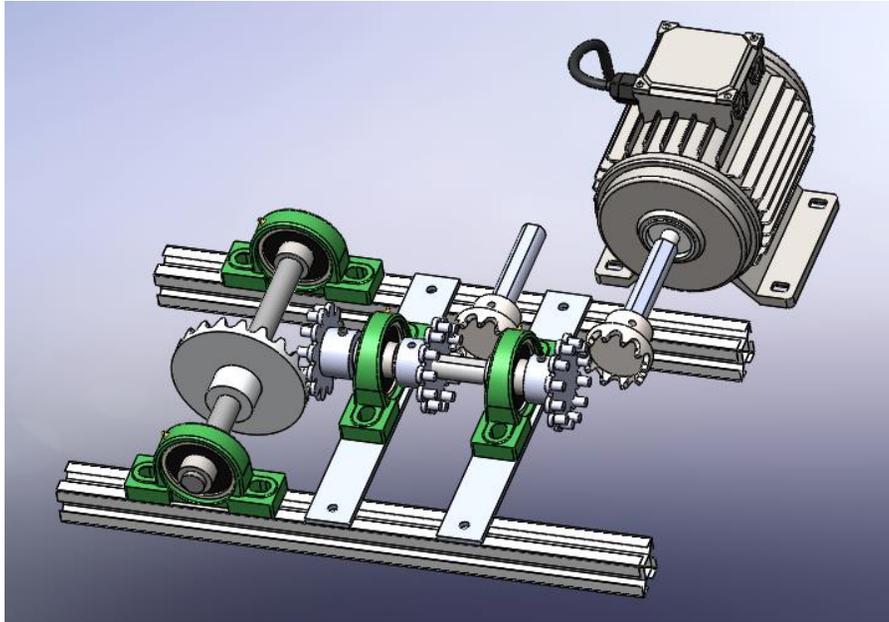
Fuente: Autor.

Ilustración 33. Entrega de potencia a más de un eje usando la misma flecha



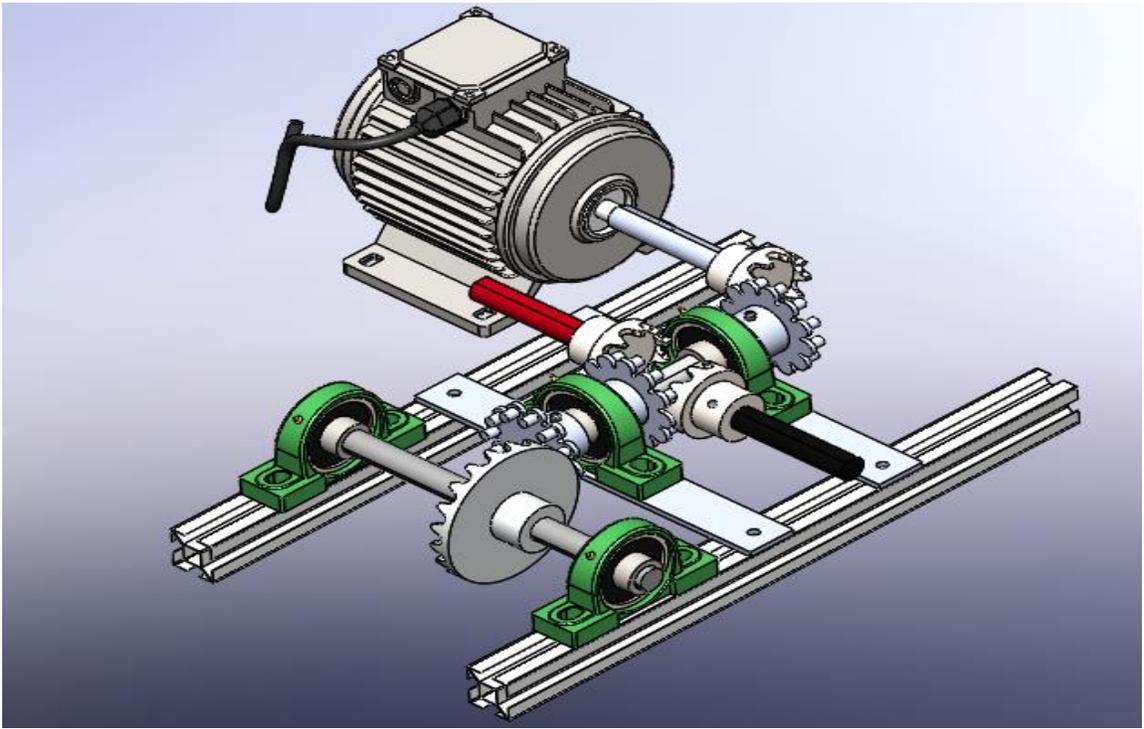
Fuente: Autor.

Ilustración 34. Entrega de potencia a dos ejes usando la misma flecha, un eje conserva el sentido de giro y el otro lo cambia



Fuente: Autor.

Ilustración 35. Entrega de potencia a múltiples ejes usando la misma flecha, unos conservan el sentido de giro y otro lo cambia

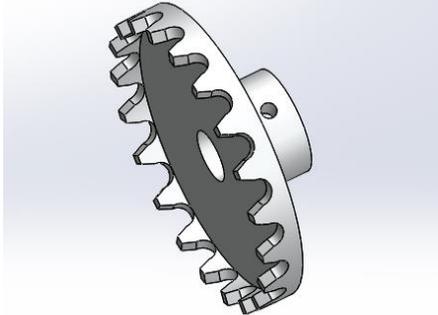


Fuente: Autor.

7.3. COTIZACIONES

Una vez el sistema de transmisión completo se procedió a realizar cotizaciones en diferentes procesos de manufactura, representadas en la siguiente tabla:

Tabla 8. Cotizaciones

Recurso		Cotizacion
Maquinaria cnc		\$400.000
Maquinado		\$300.000
Fundicion		\$250.000
Impresión 3D		\$160.000

Fuente: Autor.

Debido al alto costo de los otros procesos se optó por fabricar las piezas con impresión 3d las cuales se llevaron a cabo en la impresora 3d disponible en el campus universitario. El material más conveniente para la impresión del sistema es el Nylon por encima del ABS y PLA, debido a su resistencia al desgaste, dureza, rigidez, y coeficiente de fricción mejores que los antes mencionados. Las tolerancias debido a las contracciones térmicas propias de la impresión 3d se tuvieron en cuenta en el diseño de las piezas a imprimir.

7.4. PRODUCCIÓN Y MONTAJE DEL SISTEMA

Ilustración 36. Impresión 3D

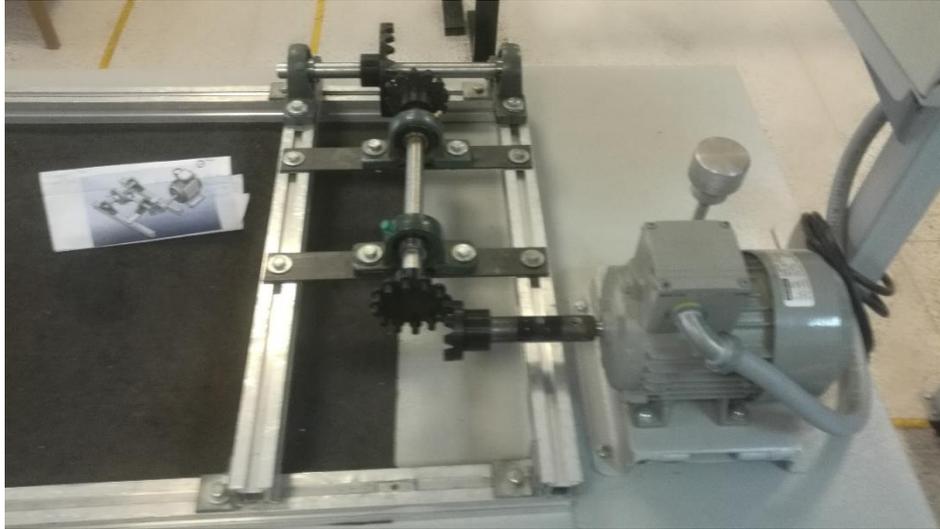


Fuente: Autor.

Una vez impresas las piezas, se procedió a quitar el material restante y llevar a cabo la instalación en el banco de prueba. La eficiencia mecánica y buen funcionamiento del sistema se ve directamente afectada si no se lleva a cabo una correcta instalación, por lo que se siguió las siguientes recomendaciones:

- Montar sólidamente la estructura y soportes.
- Alinear con sumo cuidado los engranajes y las ruedas dentadas.
- Apretar los prisioneros de las piezas.

Ilustración 37. Montaje final del sistema de transmisión



Fuente: Autor.

8. ANALISIS DE RESULTADOS

Una vez instalado el sistema de transmisión de potencia se llevó a cabo esta última etapa la cual consistía en obtener la eficiencia mecánica del sistema, en las pruebas se siguió la metodología y procedimientos planteados en el presente libro.

8.1. ERRORES EN LA MEDICIÓN

Ilustración 38. Error en medición



Fuente: Autor.

Teniendo en cuenta que el torquímetro usado ofrece una precisión del $\pm 1\%$ en el rango del 5Nm a 50Nm según el fabricante, se procedió a obtener el porcentaje de error por debajo del límite de 5Nm. Tomando como dato teórico el torque nominal

del motor eléctrico (2.24Nm) y dato experimental el torque obtenido por la herramienta se obtiene:

$$\%Error\ medición = \frac{2,24 - 2,21}{2,24} * 100 = 1,339\%$$

8.2. CÁLCULO EFICIENCIA MECÁNICA

$$Potencia\ experimental\ motor = \frac{2,21[Nm] * 1590[Rpm] * 2\pi}{60} = 367,975 [W]$$

Ilustración 39. Torque del sistema



Fuente: Autor.

Suponiendo un error lineal en la medición del torquímetro se tiene que la medida real es:

$$4.20 + (4.20 * 1.339\%) = 4.256Nm$$

$$Potencia\ sistema = \frac{4.256[Nm] * 795[Rpm] * 2\pi}{60} = 354.321 [W]$$

$$\eta\ sistema = \frac{354.321}{367,975} * 100 = 96,28\%$$

En la siguiente tabla se muestra las eficiencias mecánicas de los sistemas de transmisión de potencia más comunes en el mercado, de acuerdo al resultado del índice de eficiencia mecánica del sistema de transmisión no convencional (96,28%) se puede afirmar que se superó la eficiencia mecánica de la cadena satisfactoriamente.

Tabla 9. Eficiencias mecánicas-sistemas de transmisión

SISTEMA	EFICIENCIA [%]
Engranajes	96-98%
Sistema no convencional	96.28%
Cadena	96%
Bandas	92-94%
Cardan	92%

Fuente: www.elprisma.com/apuntes/ingenieria_mecanica/transmision/)

8.3. VENTAJAS

El sistema de transmisión tiene algunas ventajas entre las que están:

- El sistema está en capacidad de transferir potencia entre una distancia de ejes considerable y variable.
- Se pueden obtener eficiencias mecánicas elevadas.
- En el sistema no existen cargas por tensión por lo que es menor respecto a otros sistemas de transmisión.
- Con el sistema de transmisión se puede transmitir potencia a varios ejes con una misma flecha.

8.4. DESVENTAJAS

Entre algunas de las desventajas que tiene el sistema de transmisión están:

- Un costo superior en componentes y más si se requiere la aplicación en ambientes especiales donde se requieran materiales con tratamientos para evitar desgastes.

- Se requieren montajes precisos.
- Se requieren prácticas de mantenimiento.
- Sonido de su operación considerablemente mayor respecto a otros sistemas.

8.5 MANTENIMIENTO

- Periódicamente observar el estado o desgaste de los componentes, fijándose en picaduras de los dientes o cilindros de las ruedas dentadas.
- Prever la distancia entre centro o ejes para facilitar las prácticas de mantenimiento.
- Al intercambiar piezas no colocar un engranaje nuevo con una rueda dentada desgastada o viceversa, esa práctica incrementa el desgaste prematuro en las piezas nuevas.
- Reemplazar los rodamientos de la flecha cuando culminen su ciclo de vida.

9. CONCLUSIONES

Se llevó a cabo la investigación del estado del arte lo que permitió encontrar el sistema de transmisión de potencia más eficiente en el mundo en el rango de 200 a 250 W, esto aportó significativamente al diseño y desarrollo del presente trabajo.

Se realizó el diseño conceptual y detallado además de los cálculos requeridos para su construcción, a través del software SOLIDWORKS se realizó su simulación gráfica y planos de los componentes.

En el software SOLIDWORKS se simuló gráficamente variaciones del sistema como una distancia mayor entre centros o ejes, cambio de sentido giro del eje donde se traslada la potencia del motor, una múltiple entrega de potencia por la misma flecha a diferentes ejes, una entrega de potencia por la misma flecha a un eje conservando el sentido de giro del motor y un eje cambiando el sentido de giro, así como la entrega de potencia por la misma flecha a dos ejes conservando el sentido de giro del motor y un eje cambiando el sentido de giro.

Se fabricó el sistema de transmisión de potencia y a través de impresión 3d se crearon las piezas de mayor complejidad en material PLA, se tuvo que tener en cuenta las tolerancias por contracción térmica propias del proceso de manufactura.

Se instaló el sistema de transmisión de potencia no convencional a un motor eléctrico de 0.5Hp (373 W) y 1600 rpm, donde se enfatizó en un montaje preciso y alineado. Además se comprobó su correcto montaje y funcionamiento a bajas revoluciones además de su relación de transmisión.

Se realizaron los respectivos cálculos de porcentaje de error, arrojando valores satisfactorios y confiables, concluyendo que a pesar de no tener la mejor instrumentación de medición de potencia y/o torque, se pudieron obtener datos confiables de la eficiencia mecánica.

Se obtuvo el índice de eficiencia mecánica y se comparó relativamente con los sistemas de transmisión de potencia más comunes en el mercado.

Para diseñar un sistema capaz de transmitir una mayor cantidad de potencia es necesario usar un material con mejores resistencias mecánicas lo cual implica volver a calcular el dimensionamiento del sistema.

10. RECOMENDACIONES

El indicador de eficiencia mecánica sufre variaciones durante el periodo operativo de los equipos, dependiendo de las condiciones particulares y los usos operativos y de mantenimiento realizados por parte del usuario final.

La metodología de ingeniería inversa una vez establecidos los parámetros del banco de pruebas, logró avances en el diseño planteado para el proyecto.

Realizar el prototipo de algunas de las piezas a escala 1:1 logró una mayor perspectiva de lo que sería el sistema.

Para el proceso de manufactura seleccionado los planos de las piezas no juegan un papel fundamental, pero aspectos como tolerancias y acabados aumentan su importancia, el material a usar para la impresión 3d de las piezas necesarias para la construcción del sistema de transmisión está sujeto a la disponibilidad en el mercado.

La eficiencia de la manufactura depende en gran medida de la calidad del material y densidad de la pieza además de aspectos propios de la impresión 3d que se deben tener en cuenta, el tiempo de impresión por pieza en el caso concreto fue de 7 horas, por lo que la fabricación tomó más de un día.

BIBLIOGRAFÍA

Ángel, Jesús. 2009. *Estudio y diseño de un sistema de transmisión* . Madrid;España : s.n., 2009.

C, ROYO. 2001. *Mecanismos centrifugos.* Madrid : Paraninfo, 2001.

Calero Pérez , Roque y Carta Gonzales, José Antonio. 1999. *Fundamentos de mecanismos y máquinas para ingenieros.* Madrid : McGraw-Hill, 1999.

Carvajal Avila, Diego Fernando y Rojas Galvis, Melvin Armando. 2010. *BANCO DE PRUEBAS DE SISTEMAS DE TRANSMISION DE POTENCIA (Tesis de pregrado).* Universidad Pontificia Bolivariana. Bucaramanga : s.n., 2010.

Díez, P. Fernández. 1993. *Energía mecánica* . s.l. : Universidad de Cantabria, 1993.

Ernie Brookins, West Fargo, ND (US). 2013 . *Mechanical power transmission system and method.* US 8,517,888 B1 United States , 27 de Agosto de 2013 .

Flores Garcia, Juan Carlos. 2016. *Sistemas de transmisión mecánica(Tesis de pregrado).* San Andrés, Universidad mayor de San Andrés. 2016. Tesis de licenciatura .

G. Ullman, David. 2017. *The Mechanical Design Process.* Sexta. s.l. : McGraw Hill, 2017.

Lopez Ansoleaga, Jagoba. 2015. SISTEMA DE TRANSMISIÓN PARA VEHÍCULO DE TRACCIÓN (Tesis de pregrado). Bilbao : s.n., 2015.

Martínez-Hernández, Eduardo(Tesis de Pregrado). 2019. Estudio y optimización del comportamiento mecánico de una transmisión tipo Cardan de una motocicleta. UNIVERSIDAD DE JAÉN. Jaén : s.n., 2019.

MAYMÓ, D. MARIAN O. 1872. Manual de mecánica práctica. Tercera. Barcelona : IMPRENTA DEL HEREDERO DE D . PABLO RIERA, 1872.

McConkey, D. (1988). Planning in a changing environment. Business Horizons, 31(5),.

MODELADO DE UNA TRANSMISIÓN HARMONIC DRIVE. Garcia Prada, Juan Carlos, Castejón, Cristina y José Iara, Omar. 2009. 2, Madrid : s.n., 2009, Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica, Vol. 13, págs. 51-65.

Oyarzún, Sebastián Alejandro Guajardo. 2013. OPTIMIZACIÓN DE LA TRANSMISIÓN DE POTENCIA EN SISTEMAS DE TRANSMISIÓN MEDIANTE CORREAS TRAPEZOIDALES(Tesis de Pregrado). Universidad del BÌO-BÌO. Biobio : s.n., 2013.

Pahl, Gerhard y Beitz's, Wolfgang. 2007. Engineering Design: A Systematic Approach. s.l. : Springer, 2007.

Ruiz, Cesar. 2009. *Transmision por cadenas.* Bogotá : Elementos de maquinas, 2009.

The world's most efficient drivetrain. CeramicSpeed™. 2018. Denmark : s.n., 2018.

Tietjen, William A. 2007. fusion studios. [En línea] 2007. [Citado el: 5 de Octubre de 2019.] <http://www.fusionstudios.com/hill-climber/index.html>.

TRANSMISION DE ENERGIA Y MOMENTUM EN SISTEMAS DISCRETOS (EBSCO). **Rozo, M y Ayala, M. 2006.** 4, 2006, Revista Colombiana de Física, Vol. 38, págs. 1427-1430.

Utilización de Sistemas Basados en Reglas y en Casos para diseñar transmisiones por tornillo sinfín. **Jorge Laureano Moya-Rodríguezl, Ana María Becerra-Ferreiroll, César A. Chagoyén-Méndezl. 2012.** 1, La habana : s.n., Enero-abril de 2012, Ingeniería Mecánica, Vol. 15.

Vanegas Useche, Libardo. 2012. Introduccion a los accionamientos de maquinas. *Libardo Vanegas Useche.* [En línea] 2012. <http://blog.utp.edu.co/lvanegas/files/2011/08/Cap-1-Int-Dis-II.pdf>.

ANEXOS

Anexo A:

Ilustración 40. Especificaciones torquímetro



Características

- Incluye certificado de calibración rastreable de acuerdo con ISO 6789: 2003
- Precisión bidireccional mejor que 1% de 10% -100% de capacidad
- Unidades de medida seleccionables: lb-in, lb-ft, oz-in, Nm, cN-m, kgf-m, kgf-cm
- Gran pantalla OLED a color. Alta visibilidad, señales de advertencia
- Idiomas seleccionables: inglés, chino, francés, alemán, italiano, polaco, portugués, ruso y español
- Duración de la batería de más de 120 horas.
- Salida USB y software de transferencia / análisis de datos
- Memoria (más de 2000 mediciones)
- Medición de ángulo OPCIONAL, consultar
- Salida de datos inalámbrica OPCIONAL, pregunte
- Salida de datos ASCII OPCIONAL, consultar

Fuente: www.checkline.com/digital_torque_wrenches/etw

Anexo B:

Ilustración 41. Ficha técnica PLA

<u>Propiedades mecánicas (*)</u>	<u>Moldeo por inyección</u>		<u>Impresión 3D</u>	
	Valor típico	Método de ensayo	Valor típico	Método de ensayo
Módulo de elasticidad a la tracción	-	-	2346,5 MPa	ISO 527 (1 mm/min)
Esfuerzo de tracción a la deformación	-	-	49,5 MPa	ISO 527 (50 mm/min)
Esfuerzo de tracción a la rotura	-	-	45,6 MPa	ISO 527 (50 mm/min)
Alargamiento a la deformación	-	-	3,3 %	ISO 527 (50 mm/min)
Alargamiento a la rotura	-	-	5,2 %	ISO 527 (50 mm/min)
Resistencia a la flexión	-	-	103,0 MPa	ISO 178
Módulo de flexión	-	-	3150,0 MPa	ISO 178
Resistencia a la prueba de impacto Izod, con mella (a 23 °C)	-	-	5,1 kJ/m ²	ISO 180
Resistencia a la prueba de impacto Charpy (a 23 °C)	-	-	-	-
Dureza	-	-	83 (Shore D)	Durómetro

Fuente: <https://ultimaker.com/download/67583/TDS%20PLA%20v3.011-spa-ES.pdf>