



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

Análisis de movimiento del dinamómetro de rodillos

Ochoa Guamán, Carlos Vinicio

Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería Automotriz

Trabajo de Unidad de Integración Curricular, previo a la obtención del

Título de Ingeniero Automotriz

Ing. Beltrán Reyna, Roberto Félix

4 de febrero del 2022

Latacunga



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de Unidad de Integración Curricular, “**Análisis de movimiento del dinamómetro de rodillos**” fue realizado por el señor **Ochoa Guamán, Carlos Vinicio** el mismo que ha sido revisado en su totalidad, analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto, cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Latacunga, 4 de febrero del 2022



Firmado electrónicamente por:
**ROBERTO FELIX
BELTRAN REYNA**

Ing. Beltrán Reyna, Roberto Félix

C.C.: 1755523923

REPORTE DE VERIFICACION DE CONTENIDO



PROYECTO DE INTEGRACION CURRICULAR_REVISION -17-10...

Scanned on: 23:33 February 1, 2022 UTC



Overall Similarity Score



Results Found



Total Words in Text

Identical Words	87
Words with Minor Changes	14
Paraphrased Words	315
Omitted Words	0



Website | Education | Businesses



Firmado electrónicamente por:
**ROBERTO FELIX
BELTRAN REYNA**



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Yo, **Ochoa Guamán, Carlos Vinicio** con cedula de ciudadanía N°**1917510958**, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de Unidad de Integración Curricular: “**Análisis de movimiento del dinamómetro de rodillos**” es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Latacunga, 4 de febrero del 2022

Ochoa Guamán, Carlos Vinicio

C.C.: 1719510958



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN

Yo, **Ochoa Guamán, Carlos Vinicio** con cedula de ciudadanía N° **1719510958**, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de Unidad de Integración Curricular: “**Análisis de movimiento del dinamómetro de rodillos**” en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad.

Latacunga, 4 de febrero del 2022

Ochoa Guamán, Carlos Vinicio

C.C.: 1719510958

Dedicatoria

A mi madre Mercedes Guamán que me brindo su amor y apoyo incondicional en cada etapa de mi vida y en especial para concretar el presente proyecto.

A mi abuelo Alfredo Guamán que siempre creyó en mí y desde donde está me bendice.

OCHOA GUAMAN, CARLOS VINICIO

Agradecimiento

En primer lugar, agradezco a Dios por brindarme salud y sabiduría en estos tiempos difíciles para alcanzar cada meta que me he propuesto y poner en mi camino a cada una de las personas que directa e indirectamente me ayudaron en mi carrera universitaria.

A mis padres Mercedes y Luis que con su esfuerzo y dedicación procuraron que nunca me falte nada, son el pilar más importante en mi vida y no me alcanzara la vida para agradecer todas las cosas que hicieron por mí.

A mi hermano David por siempre estar pendiente y creer en mí.

A mis abuelos y mi familia que con su cariño, consejos y anécdotas me ayudaron a no darme por vencido y junto a mis padres guiar mi camino enseñándome lo más importante en la vida que es el respeto y el amor a la familia.

A mi amigo Sebastián que me acompañó desde el primer día en la universidad brindándome su ayuda aun cuando las cosas se complicaban. A mi Dayana gracias por los buenos momentos que compartimos y alentarme a seguir a delante.

Al Ingeniero Roberto Beltrán por la supervisión en todas las etapas de este proyecto.

OCHOA GUAMAN, CARLOS VINICIO

Tabla de contenido

Carátula.....	1
Certificación.....	2
Reporte de verificación de contenido	3
Autoría de responsabilidad	4
Autorización de publicación	5
Dedicatoria.....	6
Agradecimiento	7
Tabla de contenido.....	8
Índice de tablas	13
Índice de figuras	14
Resumen.....	17
Abstract.....	18
Generalidades	19
Introducción.....	19
Proyectos o artículos relacionados.....	20
Planteamiento del problema	21
<i>Identificación del problema</i>	21
<i>Formulación del problema</i>	21
Objetivos	21
<i>Objetivo general</i>	21
<i>Objetivos específicos</i>	21

Justificación.....	22
Hipótesis	22
Variables	23
Variables independientes.....	23
Variable dependiente.....	23
Metas	23
Fundamentación teórica	24
Reseña histórica.....	24
Dinamómetro	25
Potencia	25
<i>Potencia perdida por resistencias mecánicas.....</i>	25
<i>Potencia en la rueda.....</i>	26
Aplicaciones del dinamómetro	26
<i>Investigación y desarrollo de motores de combustión interna y</i> <i>vehículos</i>	27
<i>Mantenimiento y verificación.....</i>	27
Tipos de dinamómetros	28
<i>Forma de entregar o absorber par y potencia.....</i>	28
<i>El sistema utilizado para acoplar el motor o el vehículo al</i> <i>dinamómetro</i>	28
Principios de operación del dinamómetro de rodillos	31
Componentes del dinamómetro de rodillos	32
<i>Estructura</i>	32

<i>Rodillos</i>	33
<i>Unidad de absorción de potencia</i>	34
<i>Ventiladores</i>	37
<i>Extractor de gases</i>	38
<i>Computadora y software</i>	39
<i>Sistema de adquisición de datos</i>	41
Parámetros que caracterizan al Dinamómetro	41
<i>Medición del par y potencia</i>	42
<i>Velocidad angular del rodillo</i>	42
<i>Medición de la velocidad angular</i>	44
<i>Análisis de esfuerzos y vibraciones</i>	46
<i>Análisis vibratorio</i>	47
Ingeniería del proyecto	48
Escenarios de carga.....	48
Diseño de la geometría.....	49
Diseño de los rodillos.....	49
<i>Eje del rodillo</i>	50
Cálculo del chavetero y chaveta para el eje del rodillo.....	50
<i>Cálculo del esfuerzo cortante de la chaveta</i>	51
<i>Cálculo del esfuerzo de aplastamiento de la chaveta</i>	52
Estructura del dinamómetro	53
<i>Dimensiones del conjunto de rodillos</i>	54
Chumacera y rodamiento del rodillo	55

<i>Determinación de la fuerza radial equivalente del rodamiento</i>	56
<i>Determinación de fuerza de empuje aplicada</i>	57
Unidad de absorción de potencia.....	58
<i>Par de torsión</i>	59
<i>Carga de camino</i>	60
<i>Resistencia al rodamiento</i>	61
<i>Estator de la unidad de absorción de potencia</i>	62
<i>Rotor de la unidad de absorción de potencia</i>	63
Chumacera y rodamiento de la unidad de absorción de potencia.....	64
Ejes de transmisión.....	67
Acoples de disco	69
Sensor de carga.....	69
<i>Cálculo de la fuerza aplicada al sensor</i>	70
<i>Capacidad de la celda</i>	70
Estructura de soporte del freno del dinamómetro	71
Protector del dinamómetro de rodillos	72
Fosa del dinamómetro de rodillos.....	73
Computador e interface.....	74
Ensamblaje del dinamómetro de rodillos	75
<i>Proceso de ensamblaje</i>	75
Cálculo de la inercia de los elementos del dinamómetro	82
<i>Cálculo de la masa de los elementos del rodillo</i>	83
<i>Cálculo del momento de inercia del eje de trasmisión</i>	86

<i>Inercia del conjunto de rodillos</i>	87
Simulación de movimiento del dinamómetro de rodillos	87
<i>Velocidad angular del neumático al Torque máximo</i>	87
Parámetros de simulación	87
<i>Velocidad angular máxima del neumático</i>	88
Parámetros de simulación	89
<i>Velocidad crítica del rodillo</i>	90
Parámetros de simulación	93
Análisis de resultados	94
Análisis de movimiento	95
<i>Análisis 1: Velocidad – Torque</i>	95
<i>Análisis 2: Velocidad máxima</i>	98
<i>Análisis 3: La velocidad crítica del rodillo</i>	99
<i>Análisis 4: Simulación de carga de camino</i>	101
Conclusiones y recomendaciones	104
Conclusiones	104
Recomendaciones	105
Bibliografía	106
Anexos	108

Índice de tablas

Tabla 1	<i>Tipos de dinamómetros</i>	35
----------------	------------------------------------	----

Índice de figuras

Figura 1.	<i>Potencia transmitida del motor hacia los neumáticos del vehículo.</i>	26
Figura 2.	<i>Esquema de acople directo al dinamómetro.</i>	29
Figura 3.	<i>Dinamómetro acoplado directamente al motor.</i>	29
Figura 4.	<i>Esquema dinamómetro de rodillos.</i>	30
Figura 5.	<i>Ejemplo de dinamómetro comercial para vehículos livianos.</i>	31
Figura 6.	<i>Dinamómetro de rodillos para vehículos livianos.</i>	32
Figura 7.	<i>Estructura del dinamómetro de rodillos fijado al piso.</i>	33
Figura 8.	<i>Rodillos del dinamómetro.</i>	34
Figura 9.	<i>Unidad de absorción de potencia.</i>	35
Figura 10.	<i>Sistema de ventilación.</i>	38
Figura 11.	<i>Instalación del extractor de gases de escape en el vehículo.</i>	39
Figura 12.	<i>Computadora conectada al dinamómetro.</i>	40
Figura 13.	<i>Software del computador.</i>	40
Figura 14.	<i>Encoder incremental.</i>	45
Figura 15.	<i>Encoder absoluto.</i>	45
Figura 16.	<i>Curva de fatiga típica de los aceros.</i>	47
Figura 17.	<i>Rodillo del dinamómetro.</i>	50
Figura 18.	<i>Chaveta</i>	53
Figura 19.	<i>Estructura para rodillos</i>	55
Figura 22.	<i>Rotor de la unidad de absorción de potencia.</i>	63
Figura 23.	<i>Unidad de absorción de potencia.</i>	64

Figura 24. <i>Reacciones del peso de la unidad de absorción de potencia.....</i>	65
Figura 25. <i>Chumacera de pie SKF SYJ 80 TF.</i>	67
Figura 26. <i>Eje de transmisión para rodillos.</i>	68
Figura 27. <i>Eje de transmisión para unidad de absorción de potencia.....</i>	68
Figura 28. <i>Acople de disco.....</i>	69
Figura 29. <i>Sensor de carga.....</i>	71
Figura 30. <i>Estructura de la unidad de absorción de potencia.....</i>	72
Figura 31. <i>Protectores del dinamómetro de rodillos.....</i>	73
Figura 32. <i>Fosa para el dinamómetro de rodillos.</i>	74
Figura 33. <i>Computador con interface de datos.</i>	74
Figura 34. <i>Rodillo con chumacera de pared acoplada.....</i>	75
Figura 35. <i>Conjunto de rodillos acoplados en la estructura.</i>	76
Figura 36. <i>Acoples de disco con chaveta insertada.....</i>	76
Figura 37. <i>Unión de rodillos con acople de disco.....</i>	77
Figura 38. <i>Estructura con el conjunto de rodillos.</i>	77
Figura 39. <i>Topes de rodillo fijados en la estructura.....</i>	78
Figura 40. <i>Unidad de absorción de potencia con los acoples.....</i>	78
Figura 41. <i>Unidad de absorción de potencia montado en su estructura.</i>	79
Figura 42. <i>Estructuras del conjunto del dinamómetro en la fosa.....</i>	80
Figura 43. <i>Unidad de absorción acoplado con el rodillo principal.....</i>	80
Figura 44. <i>Unidad de absorción de potencia el sensor de carga.....</i>	81

Figura 45. <i>Protecciones del dinamómetro.</i>	81
Figura 46. <i>Sistema de adquisición de datos.</i>	82
Figura 47. <i>Parámetros de simulación para torque máximo.</i>	88
Figura 48. <i>Parámetros de simulación máxima velocidad.</i>	89
Figura 49. <i>Parámetros de simulación para velocidad crítica del rodillo.</i>	93
Figura 50. <i>Ubicación del motor rotatorio.</i>	95
Figura 51. <i>Pestaña de resultados</i>	96
Figura 52. <i>Velocidad angular en torque máximo.</i>	97
Figura 53. <i>Aceleración angular en torque máximo.</i>	97
Figura 54. <i>Velocidad angular del neumático en quinta marcha.</i>	98
Figura 55. <i>Aceleración angular del neumático en la quinta marcha</i>	99
Figura 56. <i>Velocidad crítica del rodillo.</i>	100
Figura 57. <i>Aceleración angular de la velocidad crítica.</i>	100
Figura 58. <i>Torque aplicado de carga de camino.</i>	101
Figura 59. <i>Velocidad para carga de camino.</i>	102
Figura 60. <i>Aceleración para carga de camino.</i>	103

Resumen

En el presente trabajo de investigación se enfocó en realizar el análisis de movimiento del dinamómetro de rodillos utilizando un software de simulación CAD en donde se pueda visualizar el comportamiento de este equipo de diagnóstico al momento de realizar pruebas para determinar el torque y potencia de vehículos livianos a fin de obtener un diagnóstico del estado del motor de combustión interna del vehículo. Para el presente análisis del dinamómetro de rodillos se modeló los elementos que lo conforman, definiendo la geometría que tendrá el diseño basado en la norma internacional elegida y en el uso al que será destinado que en este caso es para vehículos livianos, se determinó los esfuerzos a los que estarán sometidos los elementos móviles del dinamómetro al estar en funcionamiento y la velocidad crítica del rodillo para mantener un régimen óptimo de funcionamiento y no comprometer el diseño, posteriormente se realiza el ensamblaje general de todo el conjunto. Una vez realizado el proceso anterior se procede a determinar los parámetros para el estudio de movimiento donde estos dependen del escenario establecido, la velocidad es el principal parámetro que se le asigna a cada simulación, con el trabajo realizado se realizó el análisis de resultados de gráficas proporcionadas por el software de simulación utilizado para el trabajo.

Palabras clave:

- **DINAMÓMETRO**
- **ANÁLISIS DE MOVIMIENTO**
- **DISEÑO DE ELEMENTOS - DINAMÓMETRO**
- **SIMULACIÓN DE MOVIMIENTO**

Abstract

In the present research work, the analysis of the movement of the roller dynamometer was focused on using a CAD simulation software where the behavior of this diagnostic equipment can be visualized when carrying out tests to determine the torque and power of light vehicles. in order to obtain a diagnosis of the state of the internal combustion engine of the vehicle. For the present analysis of the roller dynamometer, the elements that make it up are modeled, defining the geometry that the design will have based on the chosen international standard and on the use to which it will be destined, which in this case is for light vehicles, the efforts were determined to which the mobile elements of the dynamometer will be subjected when in operation and the critical speed of the roller to maintain an optimal operating regime and not compromise the design, then the general assembly of the entire assembly is carried out. Once the previous process has been carried out, the parameters for the study of movement are determined, where these depend on the established scenario, speed is the main parameter that is assigned to each simulation, with the work carried out, the analysis of the results of the graphs was carried out. provided by the simulation software used to work

Key words:

- **DYNAMOMETER**
- **MOTION ANALYSIS**
- **DESIGN OF ELEMENTS - DYNAMOMETER**
- **MOTION SIMULATION**

Capítulo I

1. Generalidades

1.1 Introducción

El presente proyecto comprende el análisis de movimiento del dinamómetro de rodillos diseñado para vehículos livianos con el fin de satisfacer las necesidades en el campo automotriz para determinar problemas relacionados con el torque y potencia. El dinamómetro en su acepción más simple es un instrumento que mide las fuerzas mediante la deformación elástica de un resorte calibrado empleados para absorber la potencia generada por el vehículo basado en parámetros como la velocidad de giro de las ruedas.

En Ecuador la mayoría de talleres no constan con este equipo debido al alto coste de su implementación, pero a medida que avanza la tecnología automotriz será indispensable contar con un dinamómetro en los talleres a nivel nacional, por eso es necesario un diseño que sirva de referencia para una posterior manufactura teniendo en cuenta que ha sido sometido a diferentes pruebas en el software de simulación numérica.

La investigación inicia con un estudio de movimiento mediante simulaciones gráficas para el ensamblaje de este equipo de diagnóstico que simula diferentes condiciones a las que un vehículo se somete al encontrarse tanto en la ciudad como en la carretera en un entorno controlado dentro de un taller de servicio automotriz, no obstante, este análisis no modifica el modelo de ensamble del dinamómetro ni sus parámetros de diseño.

1.2 Proyectos o artículos relacionados

Tema: Diseño de un dinamómetro de rodillos para determinar potencia y torque de vehículos livianos

Autor: Armando Baltazar Soto

Institución: Universidad Mayor de San Andrés

Año: 2017

Observación: El proyecto de grado comprende el diseño de un dinamómetro de rodillos para vehículos livianos, el cual posibilitará su posterior implementación en centros de servicio automotriz con recursos y materiales accesibles en el mercado siendo una alternativa viable frente a otros dinamómetros comerciales los cuales tienen un elevado costo de implementación, esto permitirá determinar y analizar datos de rendimiento enfocados en potencia y torque de cualquier vehículo liviano.

Tema: Diseño de un dinamómetro de chasis para vehículos de hasta 3500 kg de peso bruto vehicular.

Autor: Miguel Ángel Cerecero Olivera

Institución: Universidad Nacional Autónoma de México

Año: 2017

Observación: En este proyecto se presenta el diseño conceptual de un dinamómetro de chasis para vehículos livianos, el cual será factible para su posterior construcción y susceptible de ser utilizado tanto en centros de servicio automotriz, centros de control de emisiones para vehículos automotores, además en laboratorios donde se realicen pruebas para vehículos ligeros luego de su reparación u optimización.

1.3. Planteamiento del problema

1.3.1. Identificación del problema

El diseño del dinamómetro de rodillos consta de elementos o parámetros críticos para su correcto funcionamiento; la falta de pruebas con respecto al análisis de movimiento del dinamómetro no permite tener una estimación de la velocidad crítica de funcionamiento de los rodillos, el mismo que a elevadas velocidades entra en resonancia produciendo oscilaciones de gran amplitud, ocasionando daños al equipo y en la estructura que lo soporta, para lo cual es necesario la utilización de métodos adecuados con el fin de alcanzar resultados óptimos.

1.3.2. Formulación del problema

En base a la situación descrita anteriormente, surge la necesidad de desarrollar la simulación de movimiento del dinamómetro para verificar el comportamiento de éste, donde interviene el cálculo de las velocidades y aceleraciones a las que giraran los rodillos, factores que son importantes al momento de diseñar ejes, debido a que hablaremos de un análisis de dinámica rotacional esto también comprende el estudio de las fuerzas y par de torsión que actúan sobre los componentes móviles.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Diseñar y simular un dinamómetro de rodillos para determinar potencia y torque de vehículos livianos en el Ecuador.

1.4.2. Objetivos específicos

- Realizar el prototipo virtual del dinamómetro de rodillos mediante el uso de software de diseño CAD.
- Calcular la velocidad crítica de los rodillos que producirán oscilaciones de gran amplitud.

- Determinar las condiciones de movimiento del dinamómetro de rodillos para cumplir con su destino de servicio.
- Realizar el análisis de movimiento del dinamómetro de rodillos mediante el uso de software de diseño CAD.

1.5. Justificación

En la universidad y en los talleres de servicio automotriz se torna difícil adquirir un dinamómetro de rodillos por su elevado costo que permita realizar diagnósticos de fallas, facilitando la obtención de curvas características de potencia y torque de vehículos livianos que serán derivadas en la determinación del desempeño del motor, además se presenta el tema de la seguridad, una modificación en el motor incrementando sus prestaciones no garantiza que la caja de cambios lo soporte ocasionando un accidente por este motivo la utilización de un dinamómetro es la forma más segura de producir la marcha de un vehículo para obtener los resultados deseados.

Es por su aplicación en el campo automotriz que los elementos móviles que conforman el equipo, deben ser sujetos a estudio. El análisis del movimiento del dinamómetro de rodillos permitirá asegurar la fiabilidad de los cálculos y que prevenga situaciones resonantes que terminen en roturas mecánicas resultando muy perjudicial y de alto riesgo. Los argumentos descritos anteriormente sirven para justificar la realización de este proyecto. El diseño y construcción de un dinamómetro de rodillos es una herramienta de diagnóstico muy valiosa con la que todo taller debe contar.

1.6. Hipótesis

En este estudio de suma importancia se va a realizar el análisis de movimiento que permitirá obtener las condiciones de movimiento del dinamómetro de rodillos, para cumplir con su destino de servicio, contaremos con un diseño

factible para la implementación en cualquier centro de servicio automotriz, siempre y cuando se cumplan con todos los parámetros de diseño.

1.7 Variables

1.7.1. Variables independientes

Elementos móviles del dinamómetro de rodillos.

1.7.2. Variable dependiente

Análisis y simulación de movimiento.

1.8 Metas

En el presente proyecto se pretende analizar el movimiento de los elementos móviles que componen el dinamómetro de rodillos mediante un software de simulación.

Determinar el límite de velocidad de funcionamiento del dinamómetro de rodillos mediante cálculos la velocidad y aceleraciones de los rodillos.

Obtener resultados satisfactorios del comportamiento del dinamómetro de rodillos mediante el análisis de movimiento.

Capítulo II

2. Fundamentación teórica

2.1 Reseña histórica

El dinamómetro ha sido desarrollado a lo largo de los años como una herramienta fundamental para el estudio de los motores de combustión interna. (Hartman, 2004)

En 1821 Gastard de Prony inventó el primer dinamómetro de la historia, el cual permitiría calcular el torque del motor y la fuerza transferida a un eje por medio de una banda por fricción. El método convencional para medir el torque era mediante dos resortes en cada extremo de la banda acoplada al eje del motor aplicando una pretensión a la banda. El giro del motor ocasiona un aumento de tensión en un lado mientras se produce una reducción de tensión en el otro extremo. Al medir las tensiones su diferencia se considera como el torque al conocer el diámetro del eje de salida del motor.

El primer dinamómetro hidráulico se inventó en 1877 por William Froude en Inglaterra, en 1931 se inventó el dinamómetro de corriente Eddy por Martin y Anthony Winther que gracias a sus prestaciones fue más conocido que sus antecesores que también basaban su funcionamiento en generadores DC años atrás.

En 1969 se popularizan los dinamómetros en el continente europeo de la mano de Volkswagen quien firma con Heenan & Froude, la empresa fundada por William Froude para el provisionamiento de este instrumento como método de evaluación de las prestaciones de sus motores.

Consine Dynamics crea el primer dinamómetro de rodillos con motor DC en 1976, que simula con eficacia el desempeño en carretera del motor en un ambiente controlado.

2.2 Dinamómetro

La palabra dinamómetro está conformada por dos palabras. La primera, dínamo proveniente de la palabra griega que significa potencia en movimiento. La segunda, proviene de la palabra, metro también viene de una palabra griega que significa medir (Hernandez, 2007).

Un dinamómetro es una herramienta que posibilita al usuario conocer cómo está el estado del motor. Así mismo, optimiza el rendimiento, la velocidad y la fuerza. Incluso sirve para corregir fallas que son muy complicadas de encontrar por el simple hecho de la inconstante manifestación de las mismas en condiciones regulares. También es utilizado para proyectos de disminución de emisiones y consumo de combustible (Bennett,2016, citado por Santamaría, 2016).

2.3 Potencia

La potencia indica la capacidad de ejercer una fuerza (el torque) en cierta cantidad de tiempo, desarrollada en el interior del cilindro, parte de esta se utiliza para vencer las resistencias mecánicas por lo que no se transmite de forma total a la salida del eje del motor. La potencia aporta información sobre el estado del motor ya que cualquier falla presente en los diferentes sistemas del mismo la afecta sensiblemente siento un síntoma de mal funcionamiento (Soto, 2017).

2.3.1 Potencia perdida por resistencias mecánicas

(Soto, 2017) afirma que: La potencia perdida es necesaria para mover los mecanismos internos del motor por la resistencia que presentan, está perdida debe dividirse para cuatro motivos nombrados a continuación:

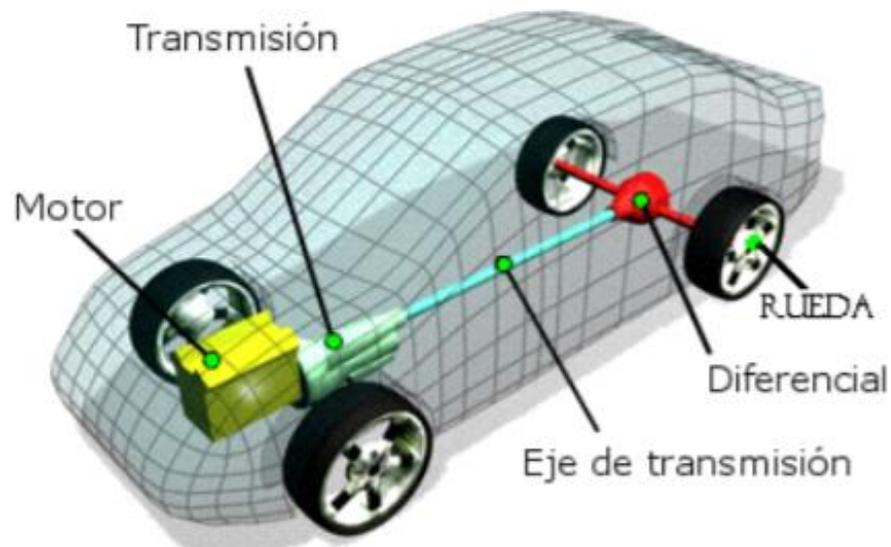
- Rozamiento en los elementos móviles del motor, fricción en cojinetes, pistón y cilindro, pasador del pistón, etc.
- Accionamiento de elementos auxiliares como la bomba de agua, bomba de aceite.

2.3.2 Potencia en la rueda

(Soto, 2017) afirma que: Es la potencia que entrega el motor a los neumáticos, desarrollada en el interior de los cilindros y transferida por la caja de transmisión hacia las ruedas, considerando todos los aspectos de pérdidas causadas por temperaturas elevadas, rozamiento, vencimiento de la inercia, fricción, etc.

Figura 1.

Potencia transmitida del motor hacia los neumáticos del vehículo.



Nota. En la figura se observa como se transmite la potencia directamente del motor al diferencial por el eje de transmisión. Tomado de (Soto, 2017).

2.4 Aplicaciones del dinamómetro

(Cerecero, 2012) afirma que: Al tratarse de una herramienta que absorbe la potencia generada por una máquina, una de sus principales aplicaciones en la actualidad está vinculada a los motores de combustión interna (MCI) y vehículos automotores, empleado para realizar pruebas relacionadas con su funcionamiento y se pueden resumir en dos grupos:

2.4.1 Investigación y desarrollo de motores de combustión interna y vehículos

Este grupo a su vez se subdivide en dos grupos más que son:

- Ensayos de investigación y desarrollo
- Ensayos de producción

El primer grupo tiene como objetivo el desarrollo de un motor o un vehículo, el análisis y las principales pruebas experimentales de los procesos se enfoca en el motor para determinar parámetros como el par del motor, potencia, presión media efectiva en cilindros, potencia absorbida por rozamiento de elementos motrices del vehículo, consumo específico de combustible, composición de gases de escape y pruebas de largo plazo con el fin de verificar la vida útil de los componentes del vehículo, incluido del motor y cargar a la computadora que controla el motor los parámetros establecidos para su correcto funcionamiento. Los dinamómetros son fundamentales para medir y simular las condiciones de operación para las que fueron diseñados los motores o vehículos en desarrollo y en interacción con otros equipos para obtener los parámetros mencionados anteriormente (Cerecero, 2012).

Por otra parte, el segundo grupo de ensayos de producción tienen como objetivo controlar las características del motor o vehículo realizando pruebas de control de calidad para que correspondan al diseño original (Cerecero, 2012).

2.4.2 Mantenimiento y verificación

En este departamento los dinamómetros son empleados como herramientas de diagnóstico, verificando el correcto funcionamiento del vehículo, mediante el análisis de la entrega de potencia y el comportamiento en condiciones simuladas de carretera. Incluye el uso para la comprobación de los niveles de emisiones contaminantes que el vehículo produce y emite a la atmósfera bajo condiciones de carga que el dinamómetro simula (Cerecero, 2012).

2.5 Tipos de dinamómetros

(Perchín, 2014) afirma que: Dependiendo de las diferentes características del dinamómetro se realizan diferentes clasificaciones. En este apartado se efectúa una distinción de los tipos de dinamómetros que se encuentran en la actualidad. Los dinamómetros pueden clasificarse por:

2.5.1 Forma de entregar o absorber par y potencia

a. Dinamómetros activos o de impulsión

Utilizados cuando se necesita conocer la potencia y el par que debe entregar el motor de una máquina para ejercer su función, como el caso de una bomba de agua. El dinamómetro se encarga de suministrar la potencia y par para realizar el ensayo (Perchín, 2014).

b. Dinamómetros pasivos o de absorción

Empleados para estudiar un motor previamente construido para cualquier propósito, la mayoría de dinamómetros se diseñan y construyen con este propósito (Perchín, 2014).

c. Dinamómetros universales

Tienen las cualidades de impulsión y absorción. Pero esto eleva su costo de implementación ya que son más complejos de los dinamómetros de absorción (Perchín, 2014).

2.5.2 El sistema utilizado para acoplar el motor o el vehículo al dinamómetro

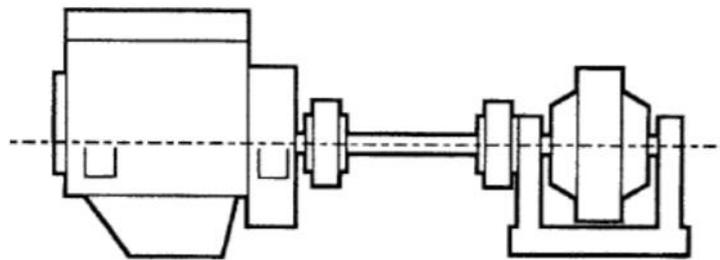
a. Dinamómetro de acople directo axial

Esta geometría es la más utilizada para acoplar el dinamómetro a un motor directamente de forma coaxial. Es económica y permite caracterizar la mayoría de los motores además de estar vinculado entre los desarrolladores y constructores de propulsores. Esto se debe a que permite realizar otro tipo de ensayos como medición de parámetros de la combustión, vibraciones, tribología entre otras. La

perfecta alineación entre el rotor del dinamómetro y el eje del cigüeñal es fundamental para evitar vibraciones que puedan alterar los datos de los ensayos. El dispositivo de absorción de par que entrega el motor a ensayar es el estator que actúa radialmente sobre la configuración anterior y es fundamental para el funcionamiento del dinamómetro (Perchín, 2014).

Figura 2.

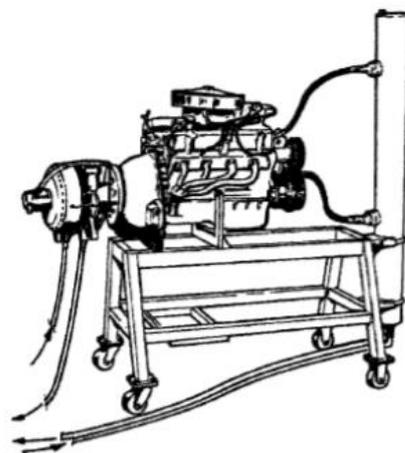
Esquema de acople directo al dinamómetro.



Nota. En la figura se observa el acoplamiento del dinamómetro a un motor directamente de forma coaxial. Tomado de (Perchín, 2014)

Figura 3.

Dinamómetro acoplado directamente al motor.



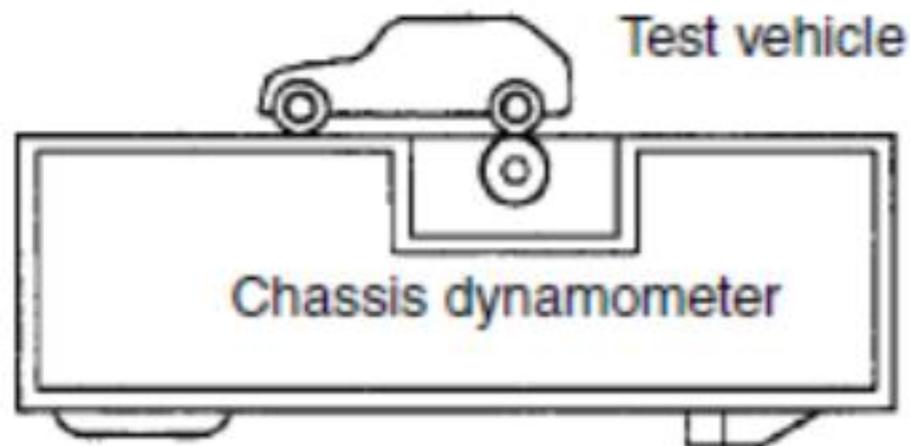
Nota. En la figura se observa al dinamómetro alineado perfectamente con el eje del motor y conectado al eje del cigüeñal para realizar la prueba. Tomado de (Perchín, 2014).

b. Dinamómetros de chasis o de rodillos

Se utilizan para estudiar el rendimiento y desempeño del motor junto con su transmisión y el resto de su sistema motriz. Las pruebas se las realiza al vehículo en condiciones estáticas, mientras que la mayoría de sus componentes se encuentran en movimiento, al encontrar en un ambiente controlado el vehículo permanece debidamente anclado por cuestiones de seguridad durante la prueba. El dinamómetro de rodillos consta de una estructura en la cual se subirá el vehículo, la estructura está equipada de uno o más rodillos que giran a una velocidad que incrementa por la acción de las ruedas del vehículo bajo ensayo. El freno del dinamómetro se encuentra acoplado de manera axial a uno de los rodillos del banco de pruebas (Perchín, 2014).

Figura 4.

Esquema dinamómetro de rodillos.



Nota. En la figura se observa al vehículo montado en la estructura del dinamómetro y a sus ruedas apoyadas en el rodillo los mismos que transmitirán el giro para realizar la prueba correspondiente. Tomado de (Perchín, 2014).

Figura 5.

Ejemplo de dinamómetro comercial para vehículos livianos.



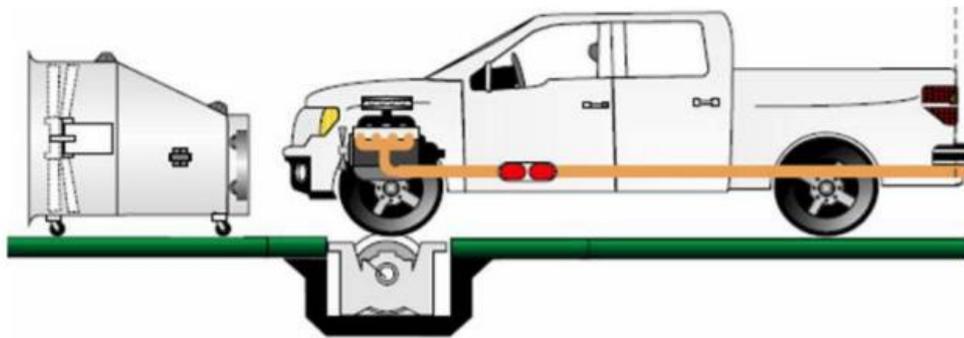
Nota. En la figura se observa que en este caso el freno del dinamómetro no se encuentra directamente acoplado al eje del cigüeñal de motor, sino de manera axial a uno de los rodillos del banco. Tomado de (Dynocom, 2021).

2.6 Principios de operación del dinamómetro de rodillos

El dinamómetro de rodillos por su diseño permite realizar las pruebas directamente al vehículo, determinando su potencia mediante el giro de los rodillos del dinamómetro que es transmitido por el contacto de los neumáticos del vehículo, los rodillos van acoplados axialmente a la unidad de absorción de potencia al tratarse de un dinamómetro de freno, simulando una condición específica de carga para determinar la potencia del motor.

Figura 6.

Dinamómetro de rodillos para vehículos livianos.



Nota. Esquema de un dinamómetro de rodillos, donde las ruedas motrices del vehículo se apoyan sobre los rodillos. Tomado de (Cerecero, 2012).

(Cerecero, 2012) afirma que: El dinamómetro de freno, su principio de operación se emplea en acoplar a los neumáticos del vehículo la unidad de absorción de potencia, dispositivo encargado de oponerse al movimiento de los neumáticos, montado de forma basculante esta posición al giro que genera una reacción que es registrada por un equipo que mide la fuerza y la transforma en una señal eléctrica que es procesada por el sistema de adquisición de datos.

El par de torsión se determina al obtener la fuerza registrada en la celda de carga y la distancia hasta el centro de giro de la unidad de absorción de potencia y consecutivamente se mide la velocidad de giro para calcular la potencia (Cerecero, 2012).

2.7 Componentes del dinamómetro de rodillos

Generalmente un dinamómetro está conformado de distintos elementos según su aplicación, pero los más habituales son los siguientes:

2.7.1 Estructura

La estructura principal es de marco metálico, fijado al piso. Su función es acoplar y soportar todos los esfuerzos ocasionados por el peso de los elementos

que componen el dinamómetro y capaz de soportar el peso de los vehículos, formando el vínculo entre el dinamómetro y el vehículo. La estructura a debe soportar las cargas y las vibraciones producidas durante las pruebas realizadas por lo que debe ser lo suficientemente rígida para no alterar los resultados obtenidos (Cerecero, 2012).

Figura 7.

Estructura del dinamómetro de rodillos fijado al piso.



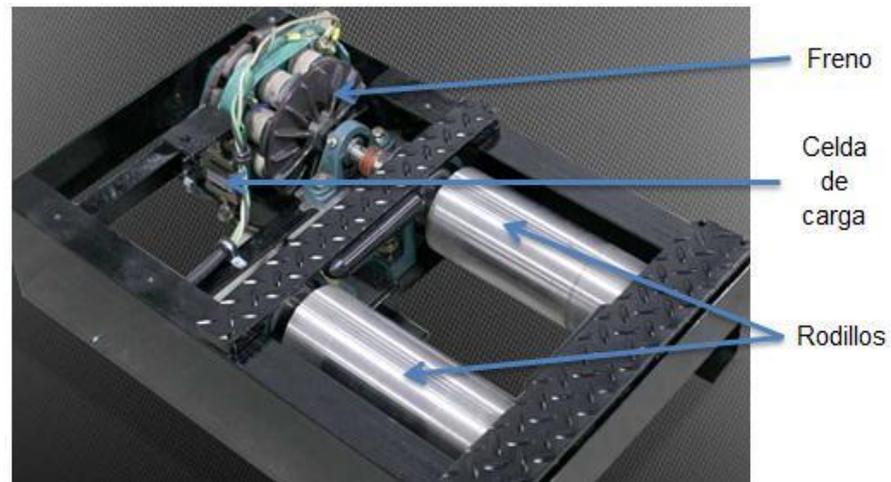
Nota. En la figura se observa un ejemplo de dinamómetro de cuatro rodillos el cual será empotrado al piso. Tomado de (Montes, 2016).

2.7.2 Rodillos

Son estructuras cilíndricas rígidas encargadas de soportar el peso del vehículo, su giro es producido por las ruedas del vehículo, transmiten la energía a la unidad de absorción de potencia que se encuentra acoplada a su eje el cual tiene un sistema que permite registrar la velocidad de giro o velocidad angular. Su diseño y construcción debe ser preciso en sus medidas ya que de eso depende que el cálculo de la inercia total rotativa del dinamómetro este dentro de los rangos especificados para el tipo de vehículos a examinar (Cerecero, 2012).

Figura 8.

Rodillos del dinamómetro.



Nota. En esta figura se muestra los rodillos, elementos móviles del dinamómetro que girara por acción de las ruedas del vehículo transmitiendo el movimiento al dispositivo de absorción de potencia. Tomado de (Hormiga, 2013).

2.7.3 Unidad de absorción de potencia

Este sistema permite variar la inercia total rotativa del dinamómetro en una amplia gama con el objetivo de simular la resistencia al avance que tendría el vehículo probado en diferentes condiciones de carretera. El peso del vehículo determina la inercia requerida y en la mayoría de los sistemas modernos se utilizan generalmente frenos eléctricos acoplados coaxialmente a los rodillos. Al contar con una fijación basculante que se opone al giro de los rodillos, la unidad de absorción de potencia al girar en el mismo sentido que los rodillos es empotrada a la estructura por medio de una celda de carga que mide la fuerza con la que el tiende a girar.

Existe otro sistema que utiliza discos como freno y se ajusta mediante el uso de volantes de inercia que van acoplados de forma escalonada al dinamómetro con el fin de aumentar la inercia total rotativa del dinamómetro dependiendo de la gama de vehículos para los que es diseñado.

Figura 9.

Unidad de absorción de potencia.



Nota. En la figura se observa el elemento encargado de realizar la medición del par del vehículo. Tomado de (Amarilla, 2006).

El dispositivo de absorción de potencia, es el componente más importante del dinamómetro de rodillos. En resumen, la función principal de este elemento consiste en realizar las medidas del par del motor o del vehículo. El diseño factible de un dinamómetro constituye en gran parte la elección correcta de un determinado tipo de freno (Perchín, 2014).

Por su principio de operación se distinguen los siguientes tipos de unidades de absorción de potencia mostrados en la siguiente tabla:

Tabla 1

Tipos de dinamómetros

Tipos de dinamómetros	Ventajas	Desventajas
Hidráulicos de llenado constante	Muy baratos y robustos	Baja respuesta a los cambios del par motor. Control difícil de automatizar.

Tipos de dinamómetros	Ventajas	Desventajas
Hidráulicos de llenado variable	Capaces de dar respuesta a pequeñas variaciones del par motor. Toleran sobrecargas al ser robustos. Capacidad de automatización.	Pueden presentar daños por corrosión y cavitación debido a que posee un llenado externo.
Hidráulicos de discos	Adecuados para operaciones que requieran altas velocidades	A bajas velocidades su rendimiento es deficiente.
Corriente continua	Tecnología muy desarrollada. Pueden actuar como dinamómetros activos.	Alta inercia además de necesitar un mantenimiento adecuado y prevención contra incendios.
Corriente alterna	Menos inercia que los de CC.	Susceptibles a daño eléctrico por lo que requieren sistemas de protección. Resultando más caros.
Imanes permanentes	Son más compactos y tienen menor inercia que los de tipo CC y CA.	Susceptibles a daño eléctrico por lo que requieren sistemas de protección. Resultando más caros.
Corrientes parasitas o de Foucault	Se adapta fácilmente al control por computador. Mecánicamente simples al tener baja inercia de sus componentes móviles.	Requieren de un sistema de refrigeración adecuado debido a que son susceptibles a sobrecalentarse.

Tipos de dinamómetros	Ventajas	Desventajas
Discos de fricción	Empleados para condiciones de baja velocidad y par motor elevado.	Velocidad de funcionamiento muy limitada.
Freno aerodinámico	Son muy simples y con bajo mantenimiento. Económicos.	Generan gran cantidad de ruido. Control muy limitado, se utilizan para aplicaciones especiales.
Híbridos o Tándem	Posibles ventajas económicas respecto al uso de dinamómetros convencionales en algunas aplicaciones.	Su construcción y modo de control es más complejo

Nota. Esta tabla muestra las ventajas y desventajas de los de los diferentes tipos de dinamómetros disponibles. Tomado de (Perchín, 2014).

2.7.4 Ventiladores

El ventilador es el encargado de evitar que el motor se recaliente, debe alcanzar la misma proporción de aire que recibe el vehículo al encontrarse en la carretera. El sistema de ventilación será ubicado en la parte frontal del vehículo para producir la variación de temperatura del motor evitando que se eleve de tal forma que dañe partes internas del motor debido a la dilatación térmica que sufrirían (Soto, 2017).

Si el dinamómetro se encuentra en un ambiente cerrado se requieren de extras y esta ventilación puede ser mediante ventanas que provean de aire extra, esto para evitar que más emisiones del motor y el extractor de gases varíen los niveles de oxígeno dentro del cuarto, también son necesarios para evitar la

alteración de los resultados en ensayos producto de la variación de la presión en el cuarto (Hernandez, 2007).

Figura 10.

Sistema de ventilación.



Nota. Sistema de ventilación se encuentra ubicado en la parte frontal para realizar la prueba con el dinamómetro. Tomado de (Montes, 2016).

2.7.5 Extractor de gases

Su función es evacuar los gases de escape generados por el motor evitando la saturación del aire en el interior del cuarto de pruebas afectando el funcionamiento y rendimiento del motor al no ingresar aire puro al motor por el múltiple de admisión (Soto, 2017).

Los gases que genera el vehículo cuando se está realizando la prueba con el dinamómetro pueden resultar perjudiciales para los operadores que se encuentren en el cuarto de pruebas, teniendo como consecuencia intoxicaciones, incluso llegar hasta la muerte del operador (Soto, 2017).

Figura 11.

Instalación del extractor de gases de escape en el vehículo.



Nota. En la figura se observa la extracción de los gases de escape producidos al momento de realizar la prueba. Tomado de (Klimawent, 2021).

2.7.6 Computadora y software**a. Computadora**

Para poder procesar todos los datos que se generan en periodos cortos de tiempo el dinamómetro requiere la conexión a un computador y así sea más fácil la visualización del rendimiento del motor mostrando las curvas características de torque, potencia y revoluciones del motor. Otra ventaja es la de guardar las mediciones registradas de anteriores vehículos con el fin de poder comparar en el mismo momento los datos obtenidos con otras pruebas realizadas anteriormente (Soto, 2017).

Figura 12.

Computadora conectada al dinamómetro.



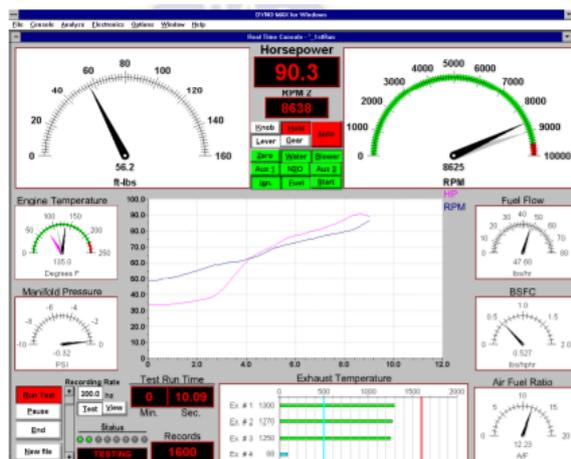
Nota. La figura representa la conexión de la computadora al dinamómetro para posteriormente procesar los datos obtenidos. Tomado de (Montes, 2016).

b. Software

El dinamómetro tiene instalados sensores y actuadores que son enlazados a la computadora por medio del software que es el programa que procesa todas las señales que recibe e interpretándolas de forma gráfica o entable de datos.

Figura 13.

Software del computador.



Nota. En la figura se observa la interpretación de forma gráfica de las condiciones de operación del vehículo en la computadora. Tomado de (Soto, 2017).

2.7.7 Sistema de adquisición de datos

Sistema conformado por partes electrónicas y mecánicas encargadas de transferir toda la información obtenida hacia la computadora, a continuación, se describen brevemente los principales componentes de este sistema:

- Medidor de velocidad angular: encargado de medir los cambios instantáneos en las revoluciones por minuto (rpm) de los rodillos, la velocidad es un parámetro determinante sobre la capacidad de medición del dinamómetro.
- Medidor RPM motor
- Medidores de referencia de la presión atmosférica, temperatura ambiente, humedad relativa y temperatura de ciertos elementos del motor.
- Multiplexor de señales: Es un circuito electrónico responsable de recibir todas las señales que se originan en los sensores y dependiendo la selección de una de ellas se transfiere al convertidor analógico/digital.
- De acuerdo a las necesidades y el equipamiento de cada dinamómetro se puede implementar un analizador de gases para: Oxígeno, O₂ (%); Monóxido de carbono, CO (%); Dióxido de carbono, CO₂ (%); Hidrocarburos, HC (ppm) y Óxidos de nitrógeno, NO_x (ppm). El analizador se comunica con la computadora de manera serial.

2.8 Parámetros que caracterizan al Dinamómetro

A continuación, se realiza una introducción teórica de los parámetros principales que caracterizan el diseño y el funcionamiento de los componentes del dinamómetro referidos a este proyecto.

2.8.1 Medición del par y potencia

(Perchín, 2014) afirma que: La lectura del par en la rueda mediante el dinamómetro de rodillos es uno de los datos más importantes. La potencia en la rueda se determina con la obtención de las medidas del par y velocidad angular de las ruedas del vehículo, con la ayuda de la siguiente ecuación:

$$P = M \cdot \omega$$

Ecuación 1

Potencia.

Nota. Tomado de (Perchín, 2014)

Donde:

- P, es la potencia en rueda del vehículo, expresada en vatios [W].
- M, es la medida del par en rueda, expresada en newton-metro [N.m].
- ω , es la velocidad angular de las ruedas motrices del vehículo, medida en [rad/s].

2.8.2 Velocidad angular del rodillo

El diámetro del rodillo dependerá de la velocidad máxima de la prueba que se establezca y de la máxima velocidad que se estime para el rodillo. El contacto por rodadura se produce por el contacto entre el neumático y rodillos, el coeficiente de fricción depende del material de construcción del rodillo (Picon, 2013). La relación de transmisión entre el neumático y el rodillo se presenta en la ecuación 1:

$$i = \frac{D_{neumático}}{D_{rodillo}} = \frac{\omega_{rodillo}}{\omega_{neumático}}$$

Ecuación 2

Relación de transmisión.

Nota. Tomado de (Picon, 2013)

Donde:

- i , relación de transmisión.
- D , diámetro [m].
- ω , velocidad angular [rad/s].

Reordenando la ecuación obtenemos la siguiente expresión:

$$\omega_{rodillo} * D_{rodillo} = \omega_{neumático} * D_{neumático}$$

Relacionamos la velocidad angular con la velocidad lineal a partir de la siguiente ecuación:

$$v = \omega * R$$

Ecuación 3

Velocidad lineal

Nota. Tomado de (Picon, 2013)

Donde:

- V , velocidad [m/s]
- ω , velocidad angular [rad/s]
- R , radio [m]

Sustituyendo se obtiene:

$$\omega_{rodillo} * 2R_{rodillo} = \omega_{neumático} * 2R_{neumático}$$

$$2v_{rodillo} = 2v_{neumático}$$

$$v_{rodillo} = v_{neumático}$$

Esta otra fórmula representa la condición de los puntos en contacto al tener un movimiento de rotación deben tener la misma velocidad línea.

2.8.3 Medición de la velocidad angular

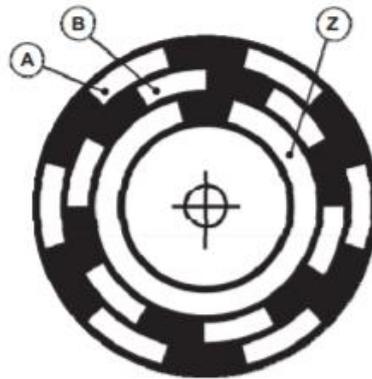
La medición de la velocidad de giro es muy importante como la del par, para obtener una lectura de datos correcta de la potencia absorbida del vehículo en la prueba. Para obtener la velocidad de giro de las ruedas del vehículo existen varios métodos, pero generalmente se suelen utilizar dos procedimientos que se describirán a continuación:

(Perchín, 2014) menciona que: El primero es utilizar un engranaje y un sensor magnético de efecto hall, que expresa lo siguiente: “Un conductor por el que circula una corriente, en presencia de un campo magnético perpendicular al movimiento de las cargas, aparece una separación de cargas que da lugar a un campo eléctrico en el interior del conductor, perpendicular al movimiento de las cargas y al campo magnético aplicado.”

La medición de la velocidad se realiza mediante la salida digital o análoga que es el valor de este campo eléctrico que depende de la velocidad de giro del eje del dinamómetro.

La segunda, es utilizar un sistema encoder rotatorio electrónico, mucho más actual y sencilla. El encoder es al ser un transductor rotativo envía una serie de pulsos digitales al transformar un movimiento rotativo en un movimiento angular. Existen dos tipos de encoder, los absolutos y los incrementales:

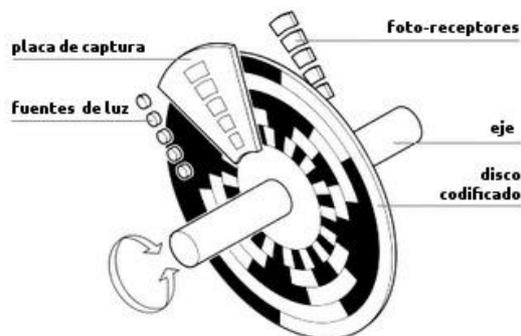
El encoder incremental suministra generalmente dos salidas de pulsos, "canal A" y "canal B" con un desfase entre sí de 90° eléctricos. La información de la velocidad de rotación se obtiene con la lectura de un solo canal, mientras que el sentido de rotación es determinado por el segundo canal en base a la secuencia de datos obtenidos de las dos señales. Dispone a su vez de otro canal que proporciona la posición absoluta del cero en el eje del encoder (Josep, 2014).

Figura 14.*Encoder incremental.*

Nota. En la figura se representa las señales incrementales A, B y Z en disco óptico.

Tomado de (Josep, 2014).

- El encoder absoluto no pierde la posición real al no existir alimentación hasta su posterior encendido, debido a que la posición queda determinada mediante la lectura del código de salida, siendo único para cada una de las posiciones dentro del giro. No se realiza la búsqueda del punto cero pues su posición se encuentra actualizada y disponible.

Figura 15.*Encoder absoluto.*

Nota. En la figura se observa las partes principales del encoder absoluto. Tomado de (Schwartz, 2020).

2.8.4 Análisis de esfuerzos y vibraciones

(Perchín, 2014) afirma que: Es indispensable realizar un estudio de los esfuerzos los que se someterá el banco de pruebas, para este análisis se tomará en cuenta a los elementos móviles del banco. La estructura que soportara el dinamómetro se encuentra sobredimensionado con el fin de soportar al vehículo y el resto de componentes del banco de pruebas, siendo más segura su instalación. Esto reducirá el impacto vibratorio en los resultados de la prueba, una rotura de la estructura del banco puede resultar en un accidente catastrófico atentando con la integridad física de los operadores del mismo.

a. Análisis bajo cargas estáticas

(Perchín, 2014) afirma que: El esfuerzo más importante al cual está sometido un eje que transmite un par de giro es el esfuerzo torsor. El esfuerzo torsor origina tensiones tangenciales o de cizalladura que han de compararse con el límite elástico o de fluencia a cortadura del material.

Se debe tomar en cuenta el esfuerzo al que va estar sometido el dinamómetro. Una carga puntual en dirección perpendicular al eje puede representarse como una parte del peso del vehículo que reposa bajo su rueda en el rodillo. Esta carga produce un esfuerzo flector en el eje y una tensión normal que se compara con el límite elástico a tracción del material (Perchín, 2014).

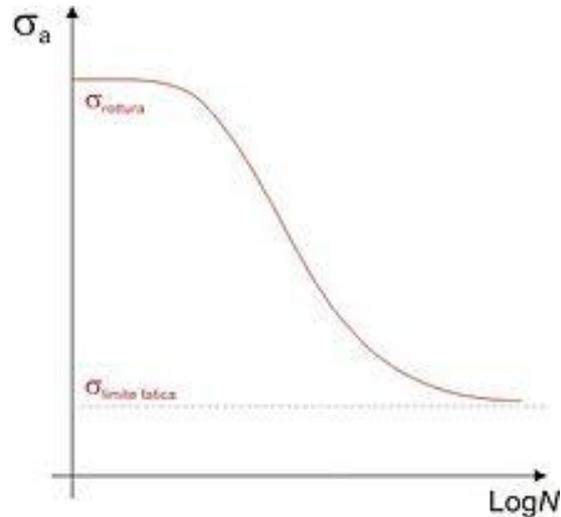
b. Análisis bajo cargas dinámicas. Fatiga

(Perchín, 2014) afirma que: El fenómeno de fatiga se presenta ante elementos mecánicos sometidos a cargas variables en el tiempo. Estas cargas pueden variar en intensidad o dirección de aplicación, pero tienen en común que su valor está muy por debajo de la resistencia del material y sin embargo van a producir una rotura repentina o catastrófica de la pieza sin deformación previa. Por este motivo, el fallo por fatiga resulta mucho más peligroso que el fallo por fluencia. La

fatiga se analiza con unas curvas experimentales que dependen de cada material. Se trata de gráficos de tensión-ciclos hasta rotura que se muestra a continuación.

Figura 16.

Curva de fatiga típica de los aceros.



Nota. La figura representa el límite de fatiga frente al logaritmo del número N de ciclos hasta la rotura. Tomado de (Perchín, 2014).

2.8.5 Análisis vibratorio

Es de vital importancia realizar un estudio de vibraciones en el diseño del dinamómetro de rodillos con el fin de evitar problemas mecánicos. Las vibraciones pueden alterar los resultados de la prueba por eso es necesario asegurar la correcta alineación del eje del rodillo y el freno del dinamómetro y evitar que ningún elemento se vea comprometido por el movimiento oscilatorio (Perchín, 2014).

(Perchín, 2014) afirma que: La velocidad crítica de un equipo rotativo es aquella en la cual se genera una frecuencia que en su magnitud es igual a la frecuencia natural del equipo. En esta condición, se dice que el equipo entra en régimen destructivo o en resonancia. Esta situación resulta muy perjudicial y peligrosa, ya que, con fuerzas aplicadas relativamente pequeñas, pueden alcanzarse amplitudes muy grandes.

Capítulo III

3. Ingeniería del proyecto

El diseño mecánico del proyecto se presenta en este capítulo. En la actualidad el diseño es una herramienta indispensable para la manufactura de máquinas, para ello se hace uso de softwares de simulación para el desarrollo de componentes en tercera dimensión, estos programas complementan su uso al poder realizar pruebas tanto estáticas y dinámicas en las piezas para comprobar su factibilidad y su posterior elaboración con el objetivo de garantizar la seguridad al estar en funcionamiento.

El dinamómetro de rodillos se compone de varios elementos que son diseñados para cumplir un objetivo específico. Es importante mencionar el proceso de ensamble de los elementos que van a interactuar entre sí para un correcto funcionamiento del dinamómetro de rodillos. Los elementos más importantes que componen este equipo de diagnóstico fueron diseñados por separado y en los próximos apartados se presentará una descripción y una muestra de los cálculos empleados para su diseño con el fin de garantizar la seguridad.

Una vez realizado el diseño de los elementos del dinamómetro es necesario realizar la simulación de movimiento, haciendo uso de estos programas lo que permitirá conocer el comportamiento del diseño al momento de estar efectuando las pruebas pertinentes en el vehículo.

3.1 Escenarios de carga

La norma aplicada para el diseño del dinamómetro NOM-047-SEMARNAT-2014 establece que el eje debe soportar un peso mínimo de 3500 kg para realizar una prueba funcional en un vehículo con el objetivo de garantizar que el dinamómetro soporte las exigencias presentes en la colocación sobre los rodillos, el desarrollo de la prueba y la salida del vehículo generando distintos escenarios.

Se han analizado tres escenarios de carga para el diseño del dinamómetro y se mencionan a continuación:

- Vehículo queda apoyado en el primer rodillo, situación que se presenta al ingreso y salida del dinamómetro.
- El vehículo está apoyado en los rodillos en situación de reposo sin empezar la prueba.
- El vehículo está apoyado en los rodillos y se está desarrollando la prueba, los neumáticos están en movimiento y se está aplicando un par de detención sobre los rodillos.

3.2 Diseño de la geometría

Considerando la función del dinamómetro y el desempeño que debe cumplir, se emplea el desarrollo de los distintos elementos que conforman el mismo. La primera parte del diseño es el rodillo al ser el elemento que irá acoplado en la estructura o chasis del dinamómetro además de soportar el peso del vehículo.

3.3 Diseño de los rodillos

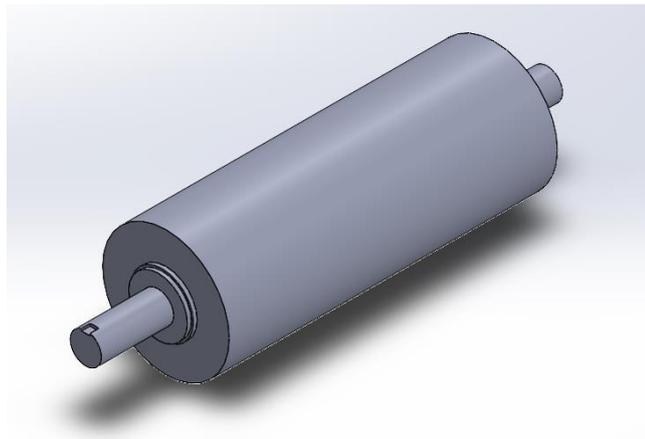
Para determinar las dimensiones del rodillo primero se realizaron pruebas estáticas y dinámicas donde se analizó las distintas cargas que intervienen en el conjunto de rodillos en los diferentes escenarios. Para el diseño del rodillo se optó por un rodillo hueco con el objetivo de obtener una menor resistencia al giro o momento de inercia, esto debido al gran diámetro del rodillo evitando una mayor masa. El diseño computarizado de este elemento móvil se realiza una vez justificado sus dimensiones por medio de análisis matemáticos y el material empleado para su diseño. El rodillo tendrá un diámetro de 0.3239 m y 0.84 m de longitud, lo que permitirá distintos tipos de anchos de rueda empleados en vehículos livianos.

3.3.1 Eje del rodillo

El eje del rodillo posee un diámetro de 80 mm, para su montaje en la estructura del dinamómetro con su respectiva chumacera. A continuación, se muestra el rodillo con su respectivo eje.

Figura 17.

Rodillo del dinamómetro.



Nota: Rodillo del dinamómetro que tendrá movimiento por acción de las ruedas del vehículo.

3.4 Cálculo del chavetero y chaveta para el eje del rodillo

La chaveta en el eje y en el cubo se diseñan para que se recargue la mitad de la chaveta en el chavetero del eje y su otra mitad en el chavetero del cubo. Para el eje se diseñará un chavetero de superficie cuadrada $F_t = 7481.297 \text{ N}$ $T_{max} = 299.252 \text{ Nm}$.

$$t_d = \frac{0.5S_y}{n_s} = \frac{2T}{dwl}$$

Ecuación 4

Esfuerzo cortante de diseño.

Nota. Tomado de (Soto, 2017).

Donde:

- t_d = esfuerzo cortante de diseño
- S_y = resistencia a la fluencia
- n_s = factor de seguridad
- T = momento torsor
- d = diámetro del eje
- w = ancho de la chaveta
- l = longitud de la chaveta

El diámetro del rodillo tiene un valor de 0.08 m, el ancho (w) de la chaveta será $\frac{1}{4}$ del diámetro del eje, entonces $w = 0.02$ m. Con base en este resultado y realizando una revisión de las chavetas comerciales en la tabla 1 en anexos, estas se fabrican de $w = 0.022$ m para ejes con diámetro de 0.075 hasta 0.085 m, con una altura $h = 0.014$ m y longitud $l = 0.022$ m, por lo que la elección de la chaveta será la antes mencionada.

3.4.1 Cálculo del esfuerzo cortante de la chaveta

Reemplazando los datos en la ecuación 4, con un factor de seguridad $n_s = 3$ para garantizar el diseño.

$$t_d = \frac{0.5S_y}{n_s}$$

$$t_d = \frac{0.5 * 180 \text{ MPa}}{3}$$

$$t_d = 30 \text{ MPa}$$

3.4.2 Cálculo del esfuerzo de aplastamiento de la chaveta

$$S_d = \frac{F_t}{A_c} = \frac{4T}{d * a * l}$$

Ecuación 5

Esfuerzo de aplastamiento de diseño.

Nota. Tomado de (Soto, 2017).

Donde:

- S_d = esfuerzo de aplastamiento de diseño
- F_t = fuerza de corte
- A_c = área de corte
- T = momento torsor
- d = diámetro del eje
- a = altura de la chaveta
- l = longitud de la chaveta

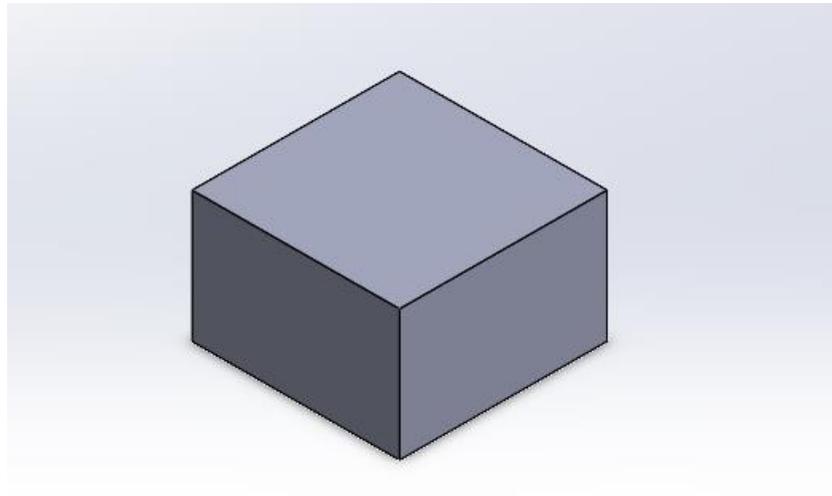
Reemplazando en la ecuación 5:

$$S_d = \frac{4T}{d * a * l}$$

$$S_d = \frac{4(299.252 \text{ N.m})}{0.08m * 0.014m * 0.022m}$$

$$S_d = 37.216 \text{ MPa}$$

Una vez realizados los cálculos correspondientes se procede a realizar el diseño de la chaveta en el software de simulación CAD. A continuación, se muestra la figura de la chaveta.

Figura 18.*Chaveta*

Nota. La mitad de la chaveta se recarga en el chavetero del eje y su otra mitad en el chavetero del cubo.

3.5 Estructura del dinamómetro

Para fácil acceso y desarrollo de las pruebas la estructura de soporte del dinamómetro será empotrada al piso, esto también dará soporte a la estructura y ayudará a la reducción de vibraciones durante las pruebas alargando la vida útil de la misma.

Una vez obtenido el diámetro de los rodillos se procede a determinar la distancia entre centros de los rodillos, para lo cual se hace uso de la ecuación 6, extraída de la normativa NOM-047-SEMARNAT-2014.

$$\text{Distancia entre ejes} = (61.913 + D) * \sin 31.62^\circ$$

Ecuación 6

Distancia entre ejes.

Nota. Tomado de (Cerecero, 2012).

Donde:

- D = Diámetro de los rodillos en cm

Reemplazamos los datos en la fórmula, la distancia puede tener una tolerancia de +0.5 in y -0.25 in del valor obtenido.

$$\text{Distancia entre ejes} = (61.913 + D) * \sin 31.62^\circ$$

$$\text{Distancia entre ejes} = (61.913 + 32.39 \text{ cm}) * \sin 31.62^\circ$$

$$\text{Distancia entre ejes} = 49.441 \text{ cm}$$

$$\text{Distancia entre ejes} = 494.41 \text{ mm}$$

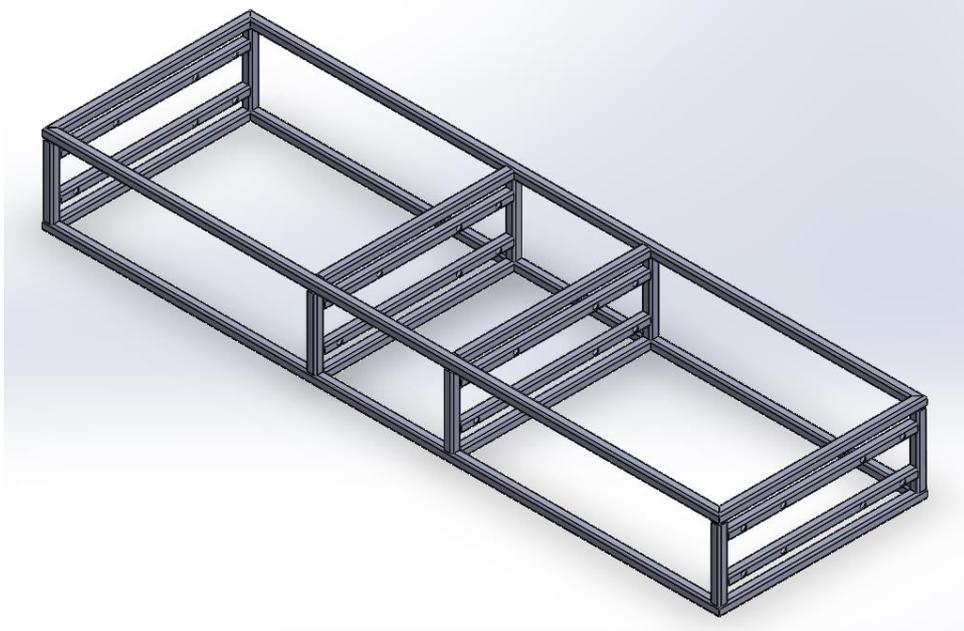
3.5.1 Dimensiones del conjunto de rodillos

La norma NOM-047- SEMARNAT-2014 establece que los rodillos del dinamómetro deben alojar vehículos con una separación mínima interior entre los neumáticos de 86 centímetros y una distancia máxima entre las caras exteriores de los neumáticos de 250 centímetros. La norma BAR 97 46 establece una distancia máxima de 243.84 [cm] y una mínima de 76.2 [cm]. (Cerecero, 2012)

El conjunto de rodillos colineales tendrá una distancia máxima de 250 cm y para la separación entre caras se optó por realizar un promedio entre los valores sugeridos por las normas mencionadas anteriormente dando como resultado de 82 cm.

Figura 19.

Estructura para rodillos

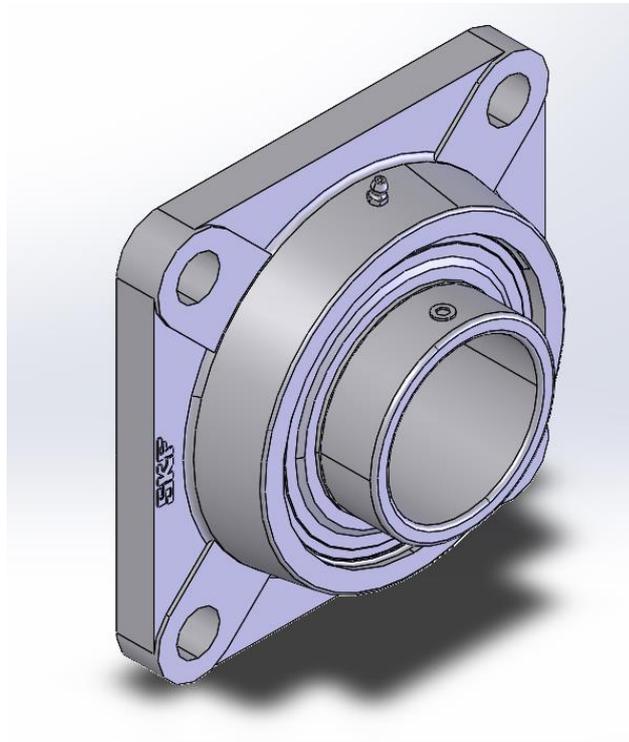


Nota. En la estructura del dinamómetro van alojados los rodillos con sus respectivas chumaceras de pared.

3.6 Chumacera y rodamiento del rodillo

La chumacera permite el acople del rodillo a la estructura del dinamómetro mediante su eje de forma simple, para el diseño se eligió el uso de rodamientos tipo chumacera, para la unidad de potencia se empleará chumaceras de pie y para los rodillos chumacera de pared.

El diámetro interior del rodamiento será igual al diámetro exterior del eje del rodillo que es 0.08 m, carga de 5383.238 N en cada rodamiento de los rodillos, la chumacera cuenta con cuatro orificios para sujetar a la estructura, las dimensiones de la chumacera de pared se encuentran en el anexo 3.

Figura 20.*Chumacera SYF 80 TF*

Nota. Chumacera de pared con rodamiento. Adaptado de chumacera con rodamiento. Tomado de (SKF, 2021).

3.6.1 Determinación de la fuerza radial equivalente del rodamiento

Un rodamiento es capaz de resistir cargas radiales y de empuje, bajo condiciones de funcionamiento estas cargas se pueden combinar. Se define un factor de rotación V de modo que $V = 1$ cuando el anillo interior gira.

$$F_e = XV F_r + Y F_a$$

Ecuación 7

Fuerza radial equivalente.

Nota. Tomado de (Soto, 2017).

Donde:

- F_e = Fuerza radial equivalente
- X = factor de radial
- V = factor de rotación
- F_r = fuerza radial aplicada
- Y = factor de empuje
- F_a = fuerza de empuje aplicada

3.6.2 Determinación de fuerza de empuje aplicada

$$F_a = \frac{0.47F_r}{K}$$

Ecuación 8

Fuerza de empuje aplicada.

Nota. Tomado de (Soto, 2017).

Donde:

- K = relación de capacidad carga radial

Teniendo la fuerza radial aplicada que es $F_r = 5383.238 \text{ N}$ y $K = 1.5$ se reemplaza en la ecuación 8.

$$F_a = \frac{0.47(5383.238 \text{ N})}{1.5}$$

$$F_a = 1686.748 \text{ N}$$

Los factores de carga radial equivalente para contacto radial es $X=0.5$, $Y=1.4$ estos datos se obtienen usando la tabla 2 de anexos. Reemplazando en la ecuación 7.

$$F_e = 0.5 * 1 * 5383.238 N + 1.4 * 1686.748 N$$

$$F_e = 2691.619 N + 2361.447$$

$$F_e = 5053.066 N$$

3.7 Unidad de absorción de potencia

El objetivo principal de este elemento es oponerse al movimiento de los neumáticos del vehículo para determinar la potencia y par que genera el motor del vehículo al que se le está realizando la prueba, no obstante, este proyecto se centra en el diseño del dinamómetro de rodillos por lo que el diseño y caracterización del freno es tema para otro proyecto de estudio.

Para objeto de diseño y simulación se ha desarrollado mediante software de simulación CAD el freno del dinamómetro que consta de dos partes principales: el rotor y el estator que se ensamblan coaxialmente.

Para el proceso de frenado se utiliza el método del brazo de par que es efectiva para la medición del par desarrollado por el vehículo, este brazo se ubica en la carcasa del estator que tiene un giro relativo con el rotor. Para el frenado el estator está conformado de un anillo inductor que al ser energizado crea un campo magnético, esta densidad de flujo magnético varía según el movimiento del rotor creando las corrientes de Foucault que son las encargadas de intervenir y oponerse al giro del rotor.

El brazo esta alineado con el centro del rotor de forma horizontal, para medir el par desarrollado por el vehículo se conecta una celda de carga en el extremo del brazo de par para limitar su movimiento.

Para elegir el freno que será empleado en el dinamómetro se considera los valores establecidos en la norma NOM-047-SEMARNAT-2014 donde se establece

que debe tener la capacidad de absorber 19 KW a velocidades superiores a 22 km/h de forma continua.

Para obtener la velocidad angular se emplea la siguiente expresión:

$$\omega = \frac{V_{rod}}{r}$$

Ecuación 9

Velocidad angular.

Nota. Tomado de (Cerecero, 2012).

$$\omega = \frac{6.111 \text{ m/s}}{0.16195 \text{ m}}$$

$$\omega = 37.734 \text{ rad/s}$$

$$\omega = 360.333 \text{ rpm}$$

3.7.1 Par de torsión

El par mínimo que debe proporcionar el dinamómetro se calcula con la siguiente expresión:

$$T = \frac{P}{\omega}$$

Ecuación 10

Torque.

Nota. Tomado de (Cerecero, 2012).

$$T = \frac{19000 \text{ w}}{37.734 \text{ rad/s}}$$

$$T = 503.525 \text{ Nm}$$

3.7.2 Carga de camino

Es la carga que el vehículo tiene al movilizarse en una carretera en condiciones normales, esta resistencia que debe ser aplicada por el freno es muy importante para la correcta elección del freno debido a que simula a fricción del aire y al rodar sobre el asfalto.

El cálculo de la carga de camino se obtiene con la siguiente expresión:

$$P_r = \left(C_R M_v g + \frac{1}{2} \rho_a C_D A_v S_v^2 \right) S_v$$

Ecuación 11

Carga de camino.

Nota. Tomado de (Cerecero, 2012).

Donde:

- P_r = Carga de camino
- C_R = Coeficiente de resistencia al rodamiento
- M_v = Masa del vehículo
- g = Aceleración de la gravedad
- ρ_a = Densidad del aire
- C_D = Coeficiente de arrastre
- A_v = Área frontal del vehículo
- S_v = Velocidad del vehículo

Para el cálculo se tomará el peso bruto del vehículo liviano Great Wall H3 de 2195 kg, área frontal de 2.5 m², los vehículos modernos promedios logran un coeficiente de arrastre entre 0.30 a 0.35, con una velocidad de desplazamiento de 80 km/h y la densidad del aire en condiciones normales de temperatura y presión es 1.205 Kg/m³.

3.7.3 Resistencia al rodamiento

Para vehículos livianos la resistencia al rodamiento se obtiene con la siguiente expresión:

$$C_R = 0.007 + 0.45 \times 10^{-6} V^2$$

Ecuación 12

Resistencia al rodamiento.

Nota. Tomado de (Cerecero, 2012).

Donde

- V = Velocidad del vehículo

Reemplazando en la expresión 12 tenemos:

$$C_R = 0.007 + 0.45 \times 10^{-6} (80)^2$$

$$C_R = 9.88 \times 10^{-3}$$

Una vez obtenidos los valores se procede a reemplazar en la ecuación 11:

$$P_r = \left(0.00988 * 2195 \text{kg} * 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} + \frac{1}{2} * 1.205 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 0.35 * 2.5 \text{m}^2 * \left(22.22 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right)^2 \right) * 22.22 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$P_r = 10510.79 \text{ w}$$

$$P_r = 10.51 \text{ kw}$$

Una vez obtenido el valor de la carga de camino se determina el par que debe proporcionar el freno del dinamómetro:

$$T_f = \frac{P_r}{\omega}$$

$$\omega = \frac{22.22 \text{ m/s}}{0.16195 \text{ m}}$$

$$\omega = 137.20 \text{ rad/s}$$

$$\omega = 1310.163 \text{ rpm}$$

$$T_f = \frac{10510.79 \text{ w}}{137.20 \text{ rad/s}}$$

$$T_f = 76.609 \text{ Nm}$$

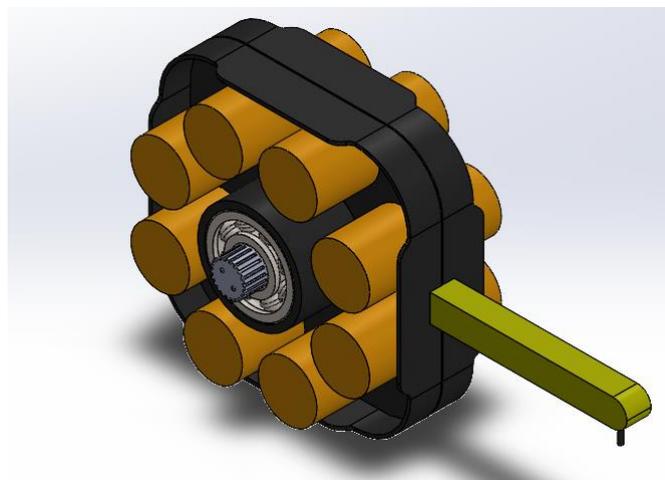
3.7.4 Estator de la unidad de absorción de potencia

El estator contiene ocho electroimanes ubicados en forma de anillo por todo su perímetro, el mismo está conformado por dos lados y en su centro se inserta el eje de la unidad de absorción de potencia para ensamblar el rotor. El diseño se ha realizado de forma genérica para realizar el ensamble completo de la unidad de absorción de potencia en el software de diseño CAD, por lo que sus dimensiones son orientativas al no contar con las patentes de diseño de este componente comercial.

A continuación, se proporciona una vista del componente desarrollado donde consta con el brazo de par para posteriormente acoplar el sensor de carga.

Figura 21.

Estator de la unidad de absorción de potencia.



Nota. Estator de la unidad de absorción de potencia acoplado con el brazo de par.

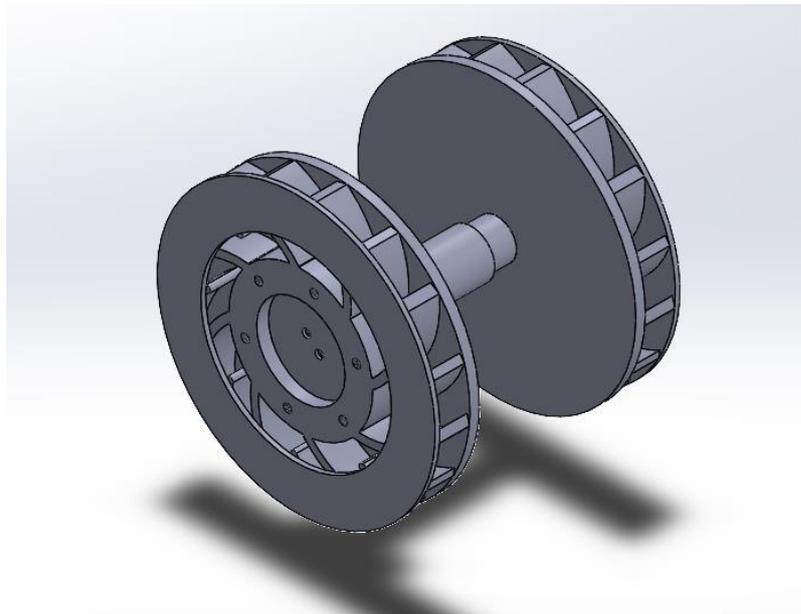
3.7.5 Rotor de la unidad de absorción de potencia

El rotor de la unidad de absorción de potencia se conforma de dos caras las cuales se encuentran estratégicamente formadas con alabes en sus caras exteriores con el objetivo de poder disipar el calor generado en el funcionamiento. En las superficies del rotor se ensamblan los acoplamientos de disco para realizar la unión con los ejes de transmisión.

De igual manera que con el estator del freno las dimensiones correspondientes al rotor del freno que se consideran para la simulación son orientativas y lo más probable es que no coincidan con las del componente comercial. A continuación, se proporciona una vista del componente desarrollado.

Figura 22.

Rotor de la unidad de absorción de potencia.

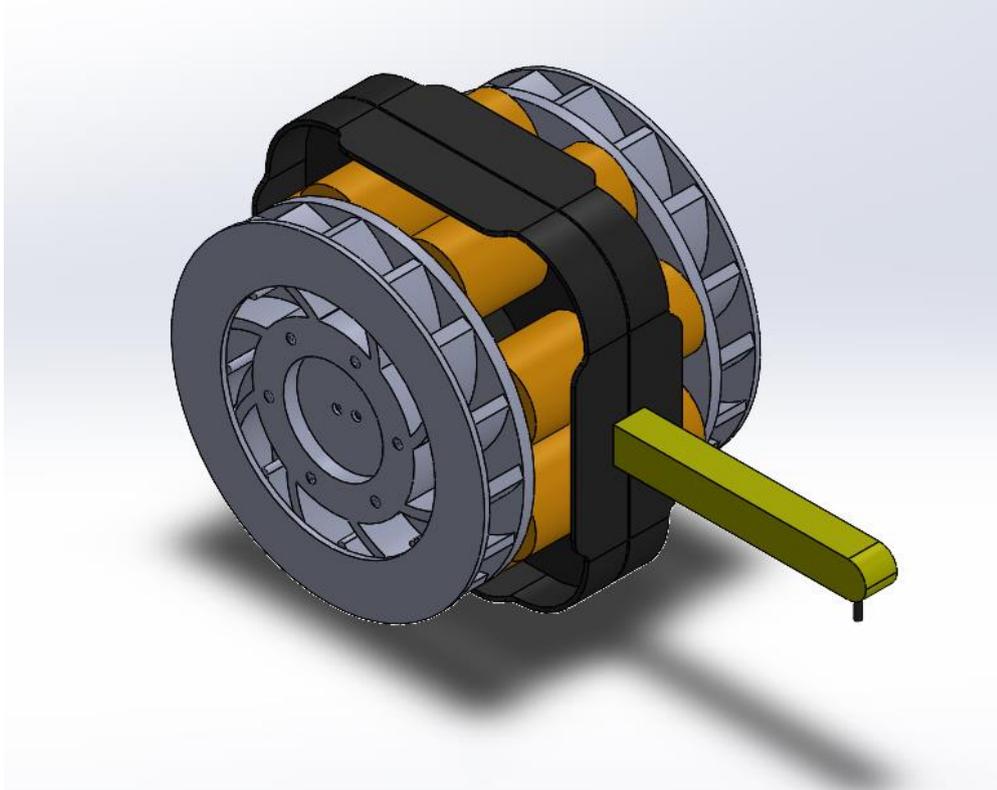


Nota. El rotor de la unidad de absorción de potencia está diseñado con alabes para disipar el calor generado por el funcionamiento.

Para terminar de diseñar la unidad de absorción de potencia a continuación se muestra una imagen con el conjunto completo armado con el estator y rotor.

Figura 23.

Unidad de absorción de potencia.



Nota. Ensamblaje de la unidad de absorción de potencia.

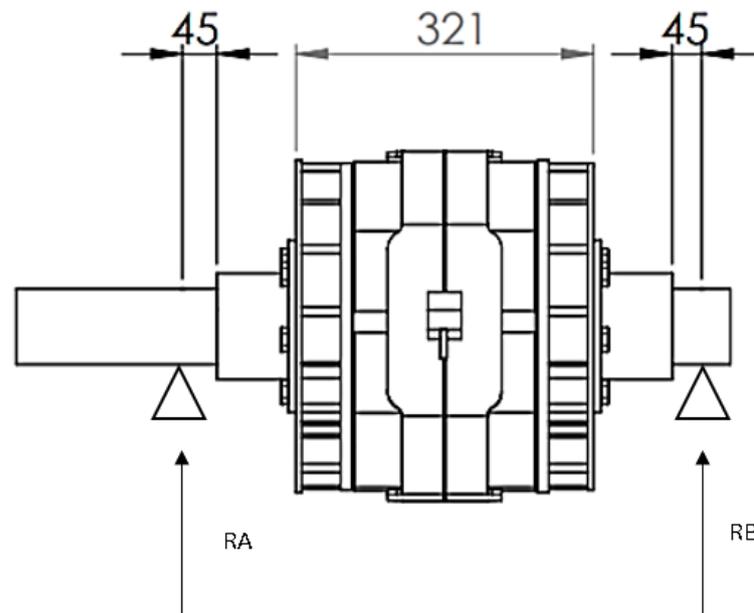
3.8 Chumacera y rodamiento de la unidad de absorción de potencia

Para la selección del rodamiento que se ubicaran en los dos ejes que se encuentran acoplados en las caras externas del rotor se procede a calcular las fuerzas de reacción que actúan en los rodamientos.

Los rodamientos solo soportan el peso de la unidad de absorción de potencia del dinamómetro que tiene un valor de 134 kg, se utilizara un factor de seguridad de 1.5.

Figura 24.

Reacciones del peso de la unidad de absorción de potencia.



Nota. Se muestra las distancias estimadas donde ejercerán las reacciones en los respectivos ejes de la unidad de absorción de potencia.

El peso de la unidad de absorción de potencia es 1314.54 N y se multiplica por 1.5 que es el factor de seguridad, lo que da como resultado 1971.81 N para garantizar la seguridad del diseño.

$$\sum F_y = 0$$

$$R_A - P + R_B = 0$$

Ecuación 13

Sumatoria de fuerzas en el eje Y.

Nota. Tomado de (Soto, 2017)

$$P = R_A + R_B$$

$$1971.81 \text{ N} = R_A + R_B$$

Se realiza sumatoria de momentos en el lado B para determinar la reacción en A. las distancias presentes para el cálculo se encuentran en milímetros.

$$\sum M_B = 0$$

$$R_A(45 + 321 + 45)mm - P\left(\frac{321}{2} + 45\right)mm = 0$$

$$R_A(411mm) - 1971.81N(205.5mm) = 0$$

$$R_A(411mm) - 405206.955N \cdot mm = 0$$

$$R_A = \frac{414080.1N \cdot mm}{411mm}$$

$$R_A = 985.905 N$$

Encontrada la reacción en A se despeja y se encuentra la reacción en B.

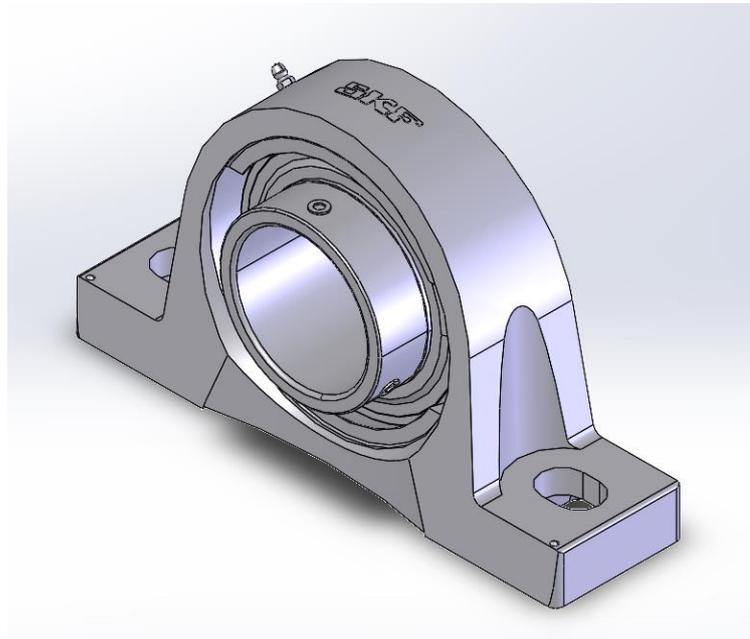
$$R_B = 1971.81N - 985.905N$$

$$R_B = 985.905N$$

Determinado las cargas a las que será sometido el rodamiento de la unidad de absorción de potencia se procedió a elegir rodamientos rígidos de bolas de una hilera convencionales con chumacera de pie, estos son productos SKF con el objetivo de asegurar la calidad del ensamble. La elección del tamaño del rodamiento está ligada a las dimensiones del eje de transmisión.

Figura 25.

Chumacera de pie SKF SYJ 80 TF.



Nota. Chumacera de pie con rodamiento. Adaptado de chumacera con rodamiento.

Tomado de (SKF, 2021).

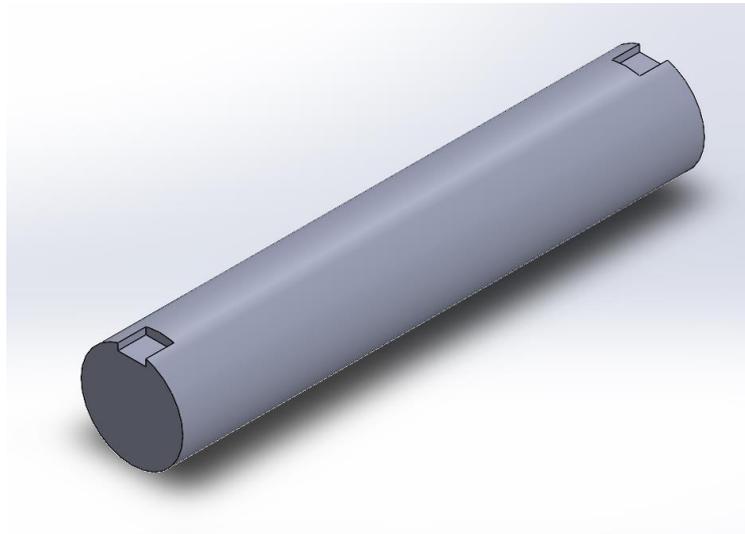
3.9 Ejes de transmisión

Los ejes conectan a los rodillos del dinamómetro entre sí transmitiendo el giro y la potencia generada por el vehículo durante la prueba al freno del dinamómetro que es la unidad de absorción de potencia.

Estos ejes se acoplan a los rodillos y otros elementos mediante acoplamientos de disco y asegurados con la chaveta diseñada anteriormente que ira ubicada entre el eje y el acople en la sección del chavetero. Las figuras a continuación muestran a los ejes utilizados para el ensamble tanto como para el rodillo y el freno del dinamómetro.

Figura 26.

Eje de transmisión para rodillos.



Nota. El eje de transmisión unirá a los rodillos entre si mediante sus respectivos acoplamientos de disco.

Figura 27.

Eje de transmisión para unidad de absorción de potencia.



Nota. El eje usado para acoplar los rodillos a la unidad de absorción de potencia, su dimensión es más corta y se distingue por la ubicación de su chavetero.

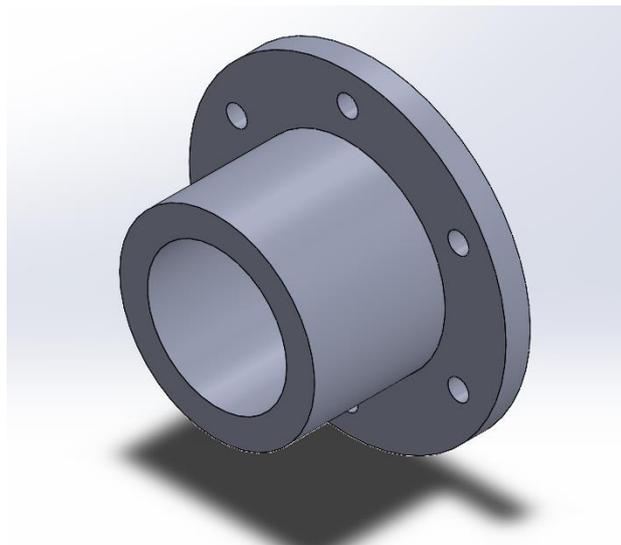
3.10 Acoples de disco

Este elemento se encarga de unir los ejes de los rodillos entre sí y a su vez a la unidad de absorción de potencia al transmitir el movimiento de giro entre los elementos acoplados. Cuenta con chavetero para evitar la pérdida de transmisión de potencia al incorporarse entre el acople y los ejes según corresponda.

Para este diseño se utilizará acoples de disco, el torque se transmite mediante los pernos de fijación. A continuación, se muestra el elemento de conexión.

Figura 28.

Acople de disco.



Nota. Este elemento se encarga de unir los ejes de transmisión.

3.11 Sensor de carga

Para conocer el par de torsión que aplicara el freno se hace uso de este elemento que se compone de una celda de carga, este sensor mide esta fuerza en condiciones de tracción o compresión. Es importante tener en cuenta el torque máximo a medir en el dinamómetro de rodillos, para elegir así el valor máximo de la celda de carga obteniendo así un mejor rendimiento.

3.11.1 Cálculo de la fuerza aplicada al sensor

La fuerza aplicada al sensor es mayor al torque proporcionado por el vehículo debido al brazo de palanca del estator de la unidad de absorción de potencia, este brazo tiene una longitud inferior a 1 m.

Para calcular la fuerza en el sensor se utiliza la siguiente expresión:

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

Ecuación 14

Fuerza aplicada al sensor de carga.

Nota. Tomado de (Soto, 2017)

Donde:

- F = Fuerza aplicada al sensor
- T = Torque
- d = longitud de brazo de par

El torque considerado para el cálculo es del vehículo Great Wall H3 el cual genera es 175 Nm, la longitud del brazo de par es 0.45m. Reemplazamos en la ecuación 14:

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

$$F = \frac{175 \text{ N.m}}{0.45\text{m}}$$

$$F = 388.889\text{N}$$

3.11.2 Capacidad de la celda

$$C_{cel} = \frac{388.889\text{N}}{9.81 \text{ m/s}^2}$$

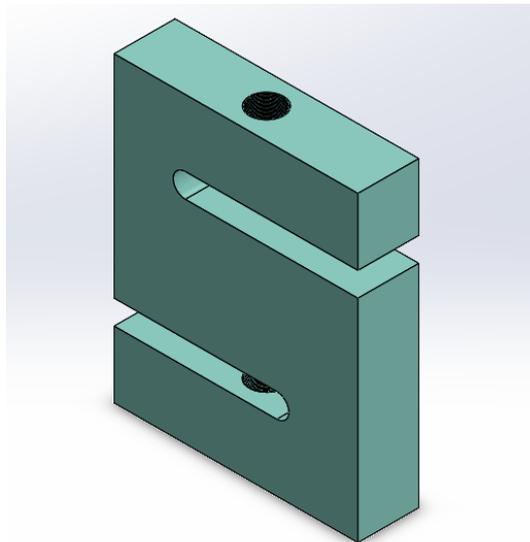
$$C_{cel} = 39.642 \text{ kg}$$

$$C_{cel} = 87.391 \text{ lb}$$

Para el diseño se hará uso de un sensor de carga de 100 lb. Una vez seleccionada el sensor se procedió a realizar su diseño en el software de simulación CAD. Las dimensiones fueron tomadas del fabricante y se encuentran especificadas en el anexo 5.

Figura 29.

Sensor de carga.



Nota. Este sensor mide la fuerza en condiciones de tracción o compresión que será interpretada por la interfaz de datos.

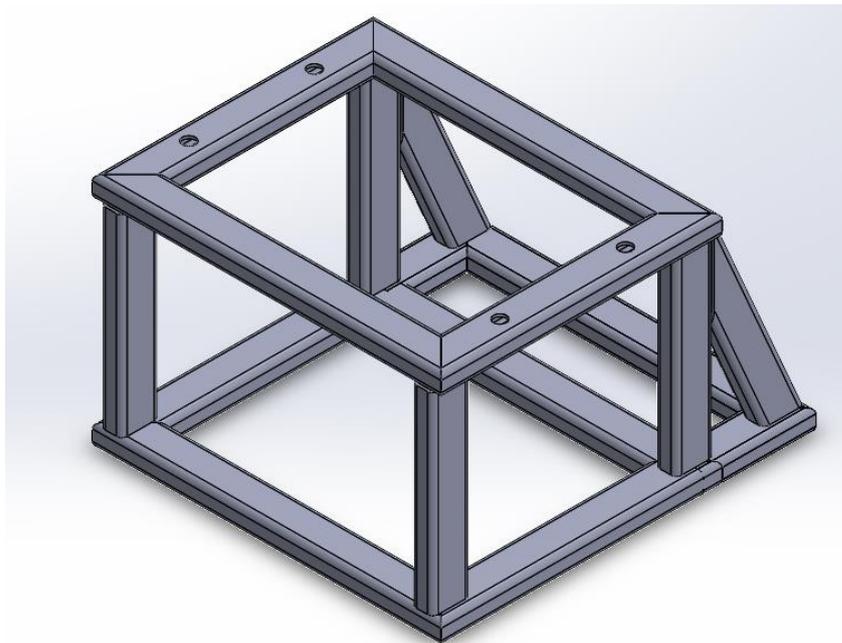
3.12 Estructura de soporte del freno del dinamómetro

Esta estructura es independiente a la de los rodillos y se coloca en el área destinada para el dinamómetro que es un lugar plano por lo que se opta por usar tubo cuadrado. Las dimensiones y el plano detallado y acotado se encuentran en el anexo 12, estas fueron estimadas para soportar la unidad de absorción de potencia y permitir la operación y desmontaje sencillo para su mantenimiento.

El área para su fijación debe ser más profunda que la estructura de los frenos esto se debe a que el freno del dinamómetro va ubicado sobre la estructura y no alojados dentro como en el caso de los rodillos. La figura a continuación se presenta la estructura que soportara al freno del dinamómetro.

Figura 30.

Estructura de la unidad de absorción de potencia.



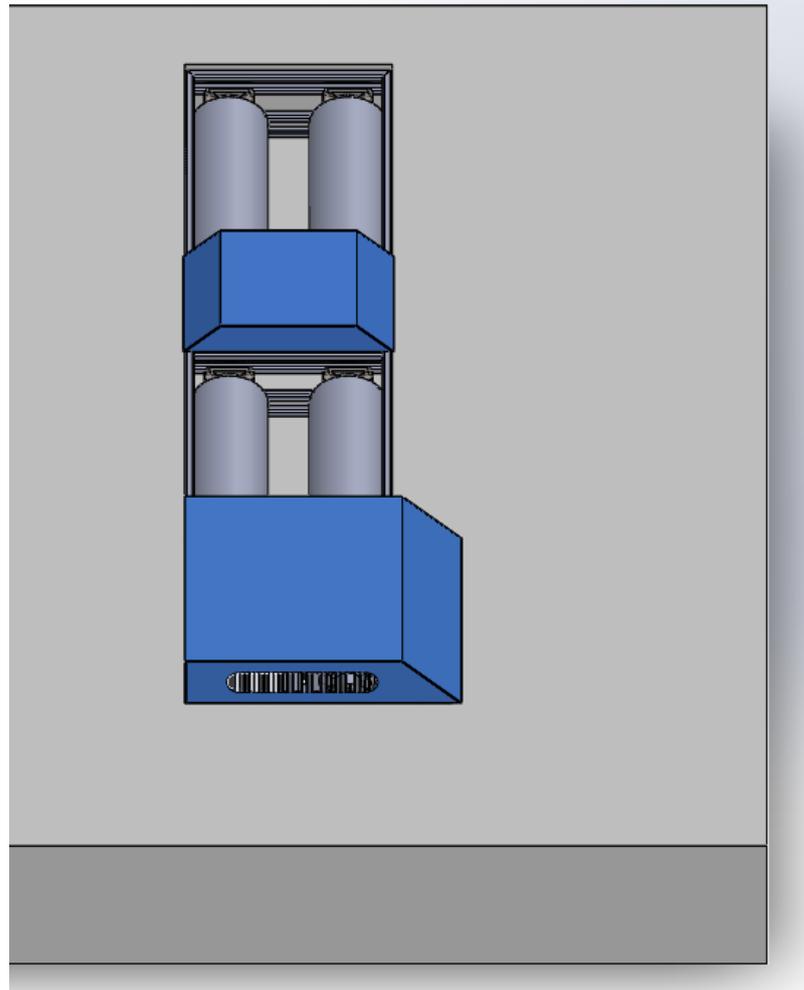
Nota. Soportara a la unidad de absorción de potencia mediante las chumaceras de pie acopladas con pernos y tuercas.

3.13 Protector del dinamómetro de rodillos

Consiste en la lámina de 5mm de grosor empleada para proteger los componentes básicos, accesorios y darle mejor apariencia al dinamómetro de rodillos. El protector de la unidad de absorción de potencia cuenta con orificios de ventilación para ayudar a la refrigeración al permitir la circulación del aire. A continuación, se muestra los protectores ubicados en el dinamómetro de rodillos.

Figura 31.

Protectores del dinamómetro de rodillos.



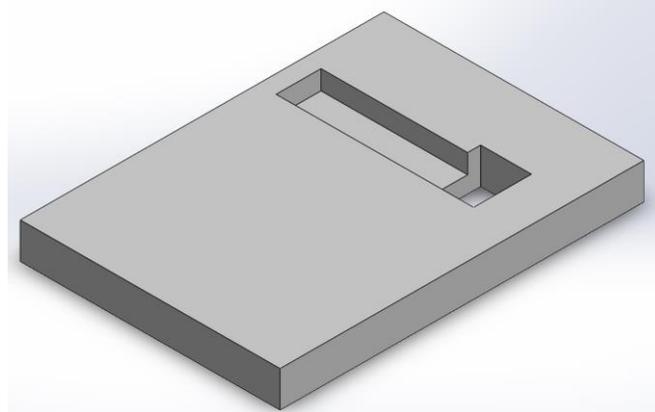
Nota. Los protectores ayudaran a proteger al operario de los componentes móviles del dinamómetro de rodillos evitando accidentes.

3.14 Fosa del dinamómetro de rodillos

El área destinada para la implementación del dinamómetro depende de la dimensión de la estructura, la superficie es plana, pero con desnivel para la unidad de absorción de potencia, las dimensiones y planos detallados se encuentran en el anexo 19. A continuación, se presenta una vista previa de la fosa.

Figura 32.

Fosa para el dinamómetro de rodillos.



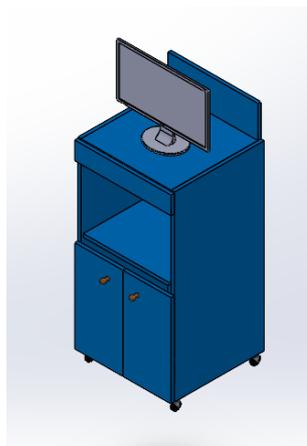
Nota. La fosa está conformada por un bloque que consta con las cavidades debidas para la implementación de los elementos del dinamómetro.

3.15 Computador e interface

Para efectos de simulación se realizó un mueble en el software de simulación CAD con su respectivo computador, estos elementos no tendrán interferencia al momento de realizar el análisis de movimiento.

Figura 33.

Computador con interface de datos.



Nota. El computador es ubicado para simple simulación y verificación de los elementos que componen al dinamómetro, el mismo no entrega datos.

3.16 Ensamblaje del dinamómetro de rodillos

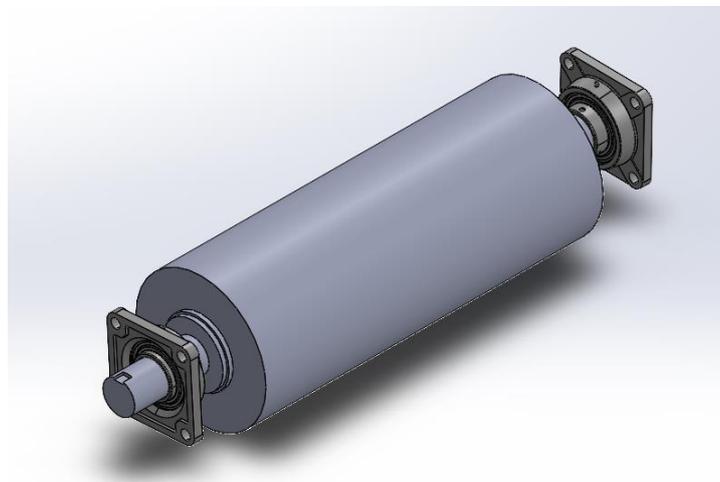
Realizado los diseños de las distintas piezas y elementos móviles del dinamómetro para este presente proyecto se procede a realizar el ensamblaje de todo el conjunto.

3.16.1 Proceso de ensamblaje

1. Se determina el área donde va a ser instalado el dinamómetro de rodillos, para aspectos de simulación se determinó un bloque y corte de profundidad para colocar las estructuras que soportaran los rodillos y freno del equipo.
2. Colocar provisionalmente las chumaceras de pared en los ejes del rodillo para fijarlos posteriormente a la estructura.

Figura 34.

Rodillo con chumacera de pared acoplada.

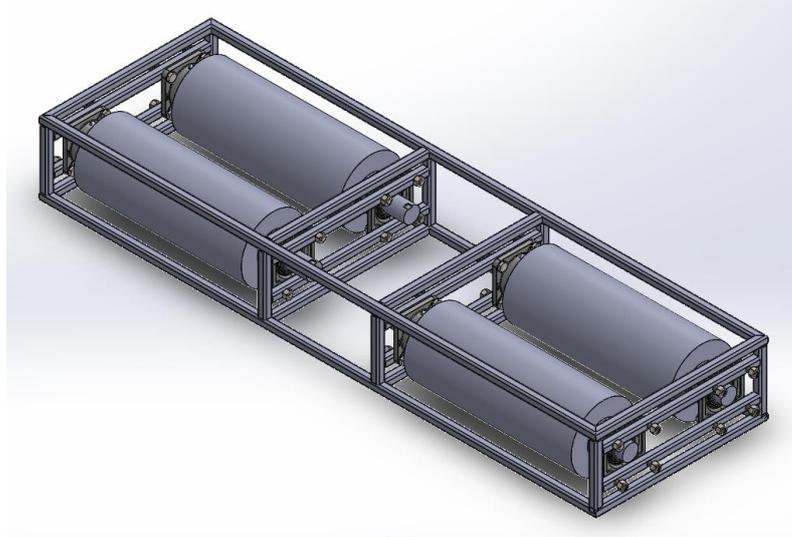


Nota. Rodillo previo a ser insertado dentro de la estructura principal.

3. Insertada la estructura se colocan los rodillos en su interior, se fija con pernos y tuercas verificando que el eje de mayor longitud apunte al centro de la estructura.

Figura 35.

Conjunto de rodillos acoplados en la estructura.

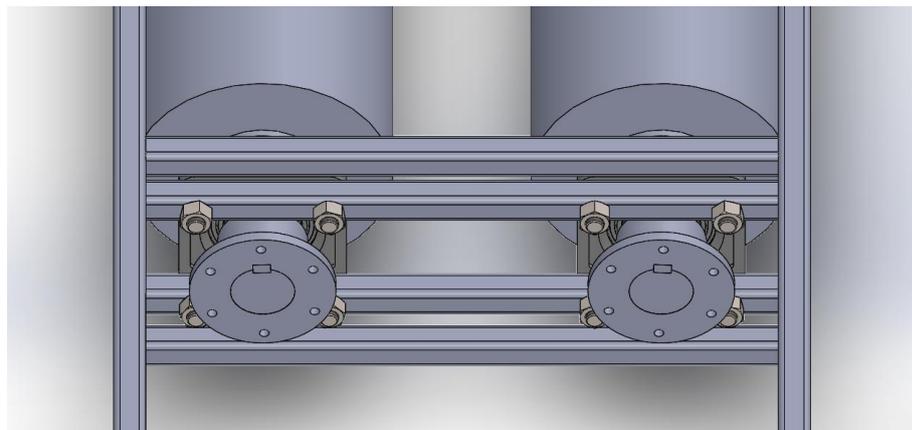


Nota. En la estructura los cuatro rodillos fueron fijados a la estructura mediante su chumacera de pared con pernos y tuercas.

4. Conectar mediante acoples de disco los ejes de transmisión a los rodillos y fijar la chaveta entre el acople y el eje.

Figura 36.

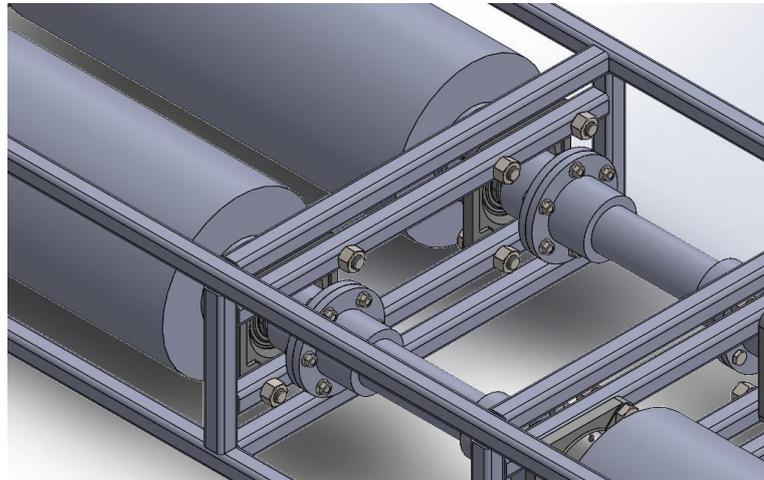
Acoples de disco con chaveta insertada.



Nota. La chaveta va ubicada entre el acople de disco y el eje del rodillo para la transmisión de movimiento con los otros ejes.

Figura 37.

Unión de rodillos con acople de disco.

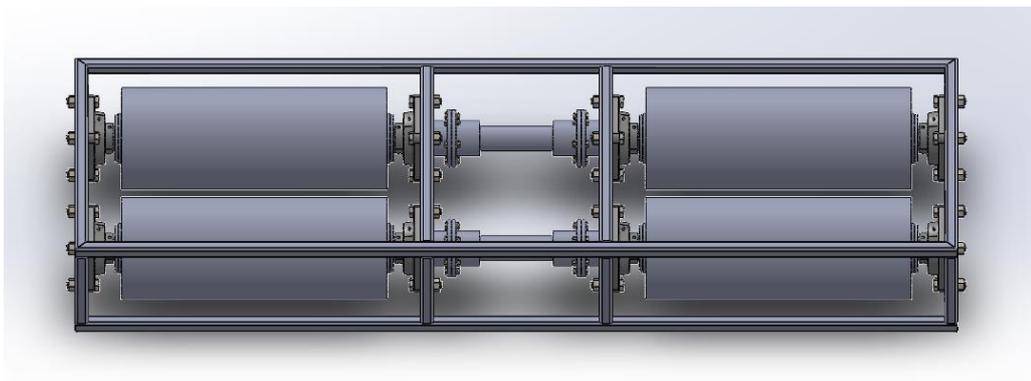


Nota. Los rodillos están conectados mediante los ejes de transmisión.

5. Vista previa del ensamblaje de la estructura con el conjunto de rodillos.

Figura 38.

Estructura con el conjunto de rodillos.

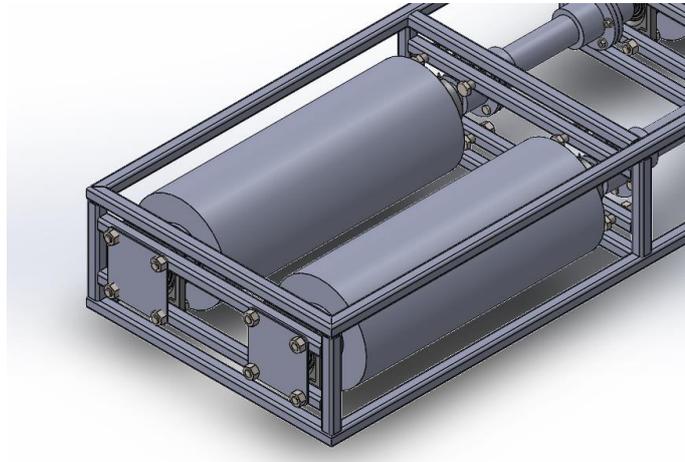


Nota. La estructura esta lista para ser insertada en la fosa que tendrá un área similar para reducir lo más posible las vibraciones.

6. Colocar los topes del rodillo para evitar movimientos axiales. Fijar con las tuercas usadas para acoplar las chumaceras de pared en la estructura.

Figura 39.

Topes de rodillo fijados en la estructura.

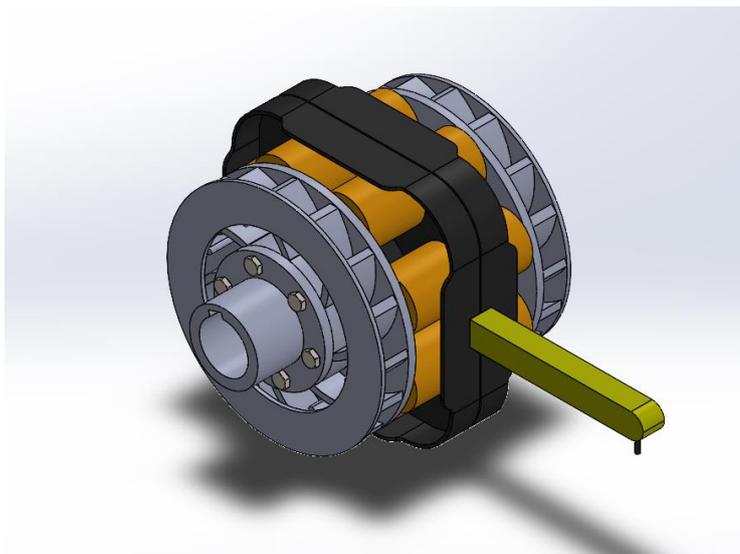


Nota. Con estos elementos se evita el movimiento axial de los rodillos evitando complicaciones al estar en movimiento.

7. Fijar los acoples de disco al rotor de la unidad de absorción de potencia del dinamómetro.

Figura 40.

Unidad de absorción de potencia con los acoples.

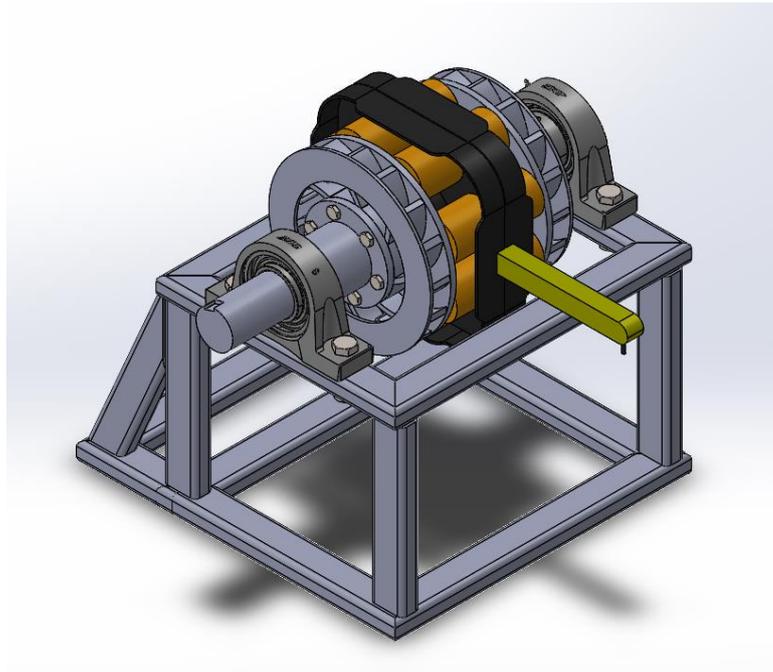


Nota. Los acoples tienen el chavetero al lado contrario para insertar la chaveta entre el eje de la unidad de absorción de potencia.

8. Insertar la estructura que soportara el freno del dinamómetro, acoplar el rodamiento y chumacera de pie al eje de la unidad de absorción de potencia para posteriormente ser fijado en la estructura.

Figura 41.

Unidad de absorción de potencia montado en su estructura.

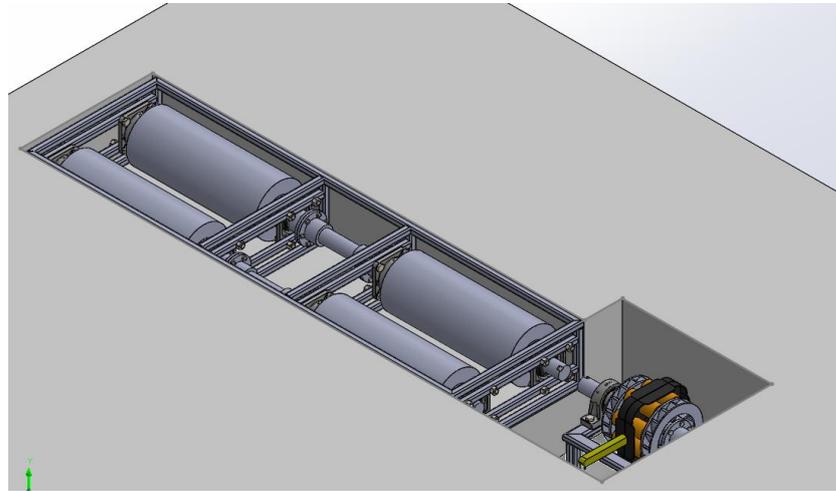


Nota. La unidad de absorción de potencia fijada en su respectiva estructura.

9. Se procede a colocar la estructura de los rodillos y de la unidad de absorción de potencia en el área que se ha designado para los mismos, las estructuras serán fijadas mediante restricciones y relaciones de posición.

Figura 42.

Estructuras del conjunto del dinamómetro en la fosa.

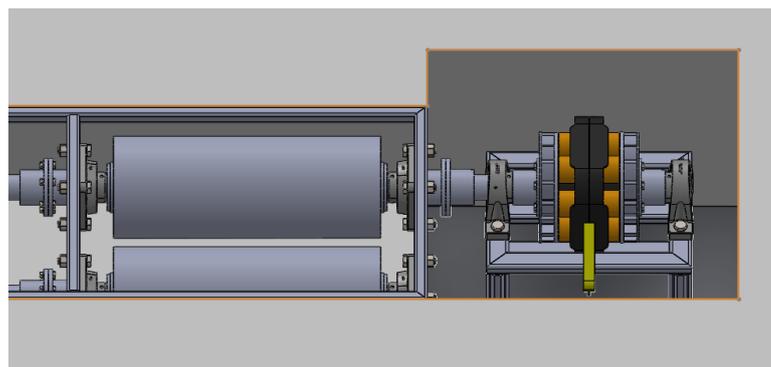


Nota. Los ejes del rodillo y la unidad de potencia deben ir alineados correctamente.

10. Conectar el acople de disco con el eje de la unidad de absorción de potencia, esto debe estar alineado con respecto al rodillo principal que transmite el movimiento.

Figura 43.

Unidad de absorción acoplado con el rodillo principal.

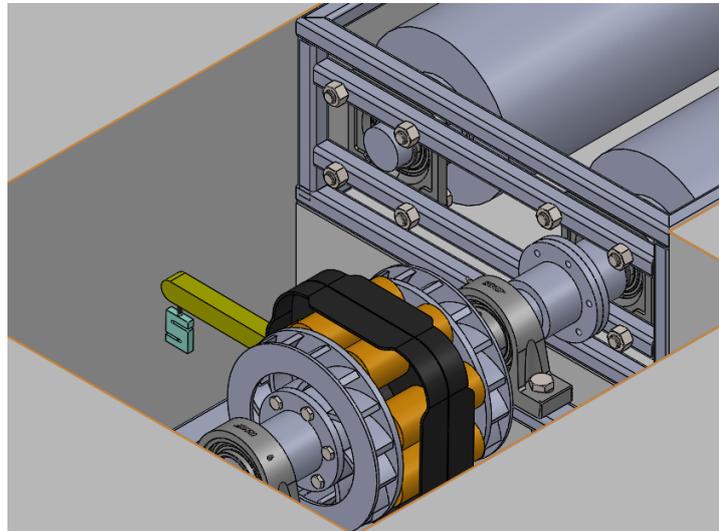


Nota. Los elementos móviles del rodillo están ensamblados y alineados correctamente con la unidad de absorción de potencia.

11. Conectar el sensor de carga en el brazo de par de la unidad de absorción de potencia.

Figura 44.

Unidad de absorción de potencia el sensor de carga.

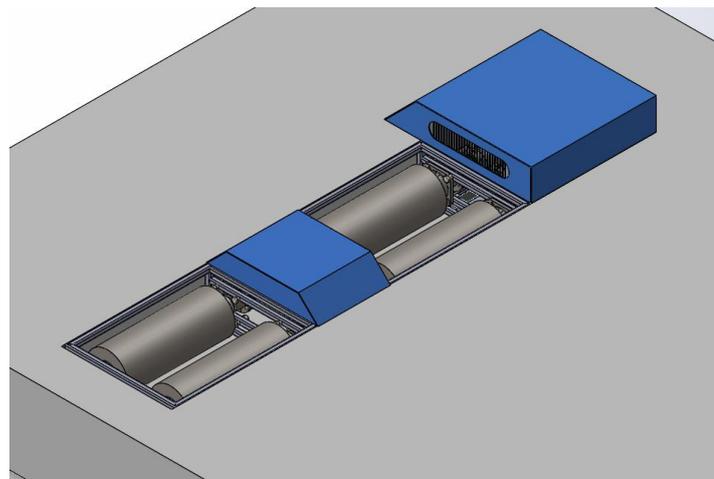


Nota. El sensor de carga debe ir conectado a la interfaz de datos.

12. Ensamblado los componentes principales del dinamómetro se fija una lámina de plancha para cubrir la unidad de absorción de potencia y los ejes de transmisión.

Figura 45.

Protecciones del dinamómetro.

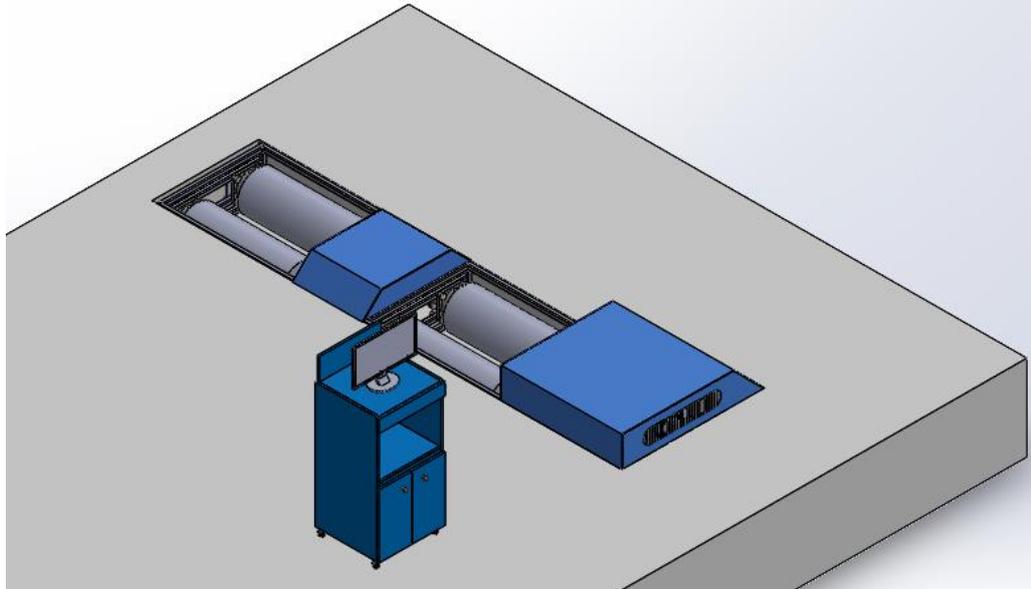


Nota. La protección de la unidad de absorción de potencia debe constar con rejillas de ventilación para la dispersión de calor.

13. Por último, se inserta el mueble con el sistema de adquisición de datos que constara de un computador con su respectivo software.

Figura 46.

Sistema de adquisición de datos.



Nota. Este elemento no tiene funcionalidad y no interfiere en la simulación del movimiento del dinamómetro.

3.17 Cálculo de la inercia de los elementos del dinamómetro

Se procede al cálculo el momento de masa de cada elemento móvil del dinamómetro, esto depende de la masa del elemento y la geometría.

El momento de masa para cilindros solidos se calcula mediante la siguiente expresión:

$$I = \frac{1}{2} m * R^2$$

Ecuación 12

Inercia de cilindros sólidos.

Nota. Tomado de (Cerecero, 2012)

Para cilindros huecos se usa la siguiente expresión:

$$I = \frac{1}{2}m(R_{ext}^2 + R_{int}^2)$$

Ecuación 13

Inercia de cilindros huecos.

Nota. Tomado de (Cerecero, 2012)

Para ambos casos:

- I = inercia
- m = masa del elemento
- R = radio

3.17.1 Cálculo de la masa de los elementos del rodillo

Se comienza por los cilindros que conforman los rodillos haciendo uso de la siguiente expresión.

$$m_{rod} = V_{rod} * \rho$$

Ecuación 14

Masa de los rodillos.

Nota. Tomado de (Cerecero, 2012)

Donde:

- m_{rod} = masa del rodillo
- V_{rod} = Volumen del rodillo

Para encontrar la masa primero se calcula el volumen con la siguiente expresión:

$$V_{rod} = \pi * (R_{ext}^2 - E_{int}^2) * L$$

Ecuación 15

Volumen de rodillos.

Nota. Tomado de (Cerecero, 2012)

Donde:

- L = Longitud del rodillo

$$V_{rod} = \pi * [(0.16195m)^2 - (0.15395m)^2] * 0.84m$$

$$V_{rod} = 0.0067m^3$$

El material empleado para el rodillo es acero SAE 1010 el cual tiene una densidad de 7800 kg/m³, se sustituye en la expresión 14:

$$m_{rod} = V_{rod} * \rho$$

$$m_{rod} = 0.0067m^3 * 7800 \frac{kg}{m^3}$$

$$m_{rod} = 52.26 kg$$

Reemplazamos en la ecuación 13.

$$I = \frac{1}{2} m (R_{ext}^2 + R_{int}^2)$$

$$I = \frac{1}{2} (52.26kg) [(0.16195m)^2 + (0.15395m)^2]$$

$$I = 1.305 Kg.m^2$$

De igual manera se realiza el mismo procedimiento para el eje del rodillo:

$$V_{eje} = \pi * r^2 * L$$

$$V_{eje} = \pi * (0.04m)^2 * (1.176m)$$

$$V_{eje} = 0.0059m^3$$

La masa del eje del rodillo se calcula a continuación:

$$m_{eje} = V_{eje} * \rho$$

$$m_{eje} = 0.0059m^3 * 7800 \frac{kg}{m^3}$$

$$m_{eje} = 46.02 Kg$$

La inercia del eje se calcula a continuación:

$$I_{eje} = \frac{1}{2}m * R^2$$

$$I_{eje} = \frac{1}{2}(46.02kg)(0.04m)^2$$

$$I_{eje} = 0.0368 Kg.m^2$$

Para las tapas de unen el rodillo y el eje se realiza el mismo procedimiento:

$$V_{tapa} = \pi * (R_{ext}^2 - R_{int}^2) * L$$

$$V_{tapa} = \pi[(0.154m)^2 - (0.04m)^2] * 0.018m$$

$$V_{tapa} = 0.00125m^3$$

La masa de la tapa del rodillo se calcula a continuación:

$$m_{tapa} = V_{tapa} * \rho$$

$$m_{tapa} = 0.00125m^3 * 7800 \frac{kg}{m^3}$$

$$m_{tapa} = 9.75 kg$$

Reemplazamos para calcular la inercia de la tapa:

$$I_{tapa} = \frac{1}{2}m(R_{ext}^2 + R_{int}^2)$$

$$I_{tapa} = \frac{1}{2}(9.75 \text{ kg})[(0.16195\text{m})^2 + (0.154\text{m})^2]$$

$$I_{tapa} = 0.2434 \text{ Kg. m}^2$$

Cada rodillo tendría su momento de inercia de:

$$I_{rodillo} = I_{cil} + I_{eje} + 2I_{tapa}$$

Reemplazando la inercia de los componentes se obtiene:

$$I_{rodillo} = 1.305 + 0.0368 + 2(0.2434) \text{ Kg. m}^2$$

$$I_{rodillo} = 2.159 \text{ Kg. m}^2$$

3.17.2 Cálculo del momento de inercia del eje de transmisión

$$V_{eje,t} = \pi * r^2 * L$$

$$V_{eje,t} = \pi * (0.04\text{m})^2 * (0.41\text{m})$$

$$V_{eje} = 0.00206 \text{ m}^3$$

La masa del eje de transmisión se calcula a continuación:

$$m_{eje} = V_{eje} * \rho$$

$$m_{eje} = 0.00206 \text{ m}^3 * 7800 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$m_{eje} = 16.074 \text{ Kg}$$

La inercia del eje se calcula a continuación:

$$I_{eje,t} = \frac{1}{2} m * R^2$$

$$I_{eje,t} = \frac{1}{2} (16.074 \text{ kg})(0.04\text{m})^2$$

$$I_{eje,t} = 0.0128 \text{ Kg. m}^2$$

3.17.3 Inercia del conjunto de rodillos

Se procede a realizar la suma de la inercia de los cuatro rodillos junto con la inercia de los ejes de transmisión.

$$I_{Conjunto} = 4(I_{rodillo}) + 2(I_{eje,t})$$

$$I_{Conjunto} = 4(2.159 \text{ Kg. m}^2) + 2(0.0128 \text{ Kg. m}^2)$$

$$I_{Conjunto} = 8.6616 \text{ Kg. m}^2$$

3.18 Simulación de movimiento del dinamómetro de rodillos

La simulación se realiza mediante estudios de movimiento para modelos de ensamblaje. Las simulaciones graficas de movimiento no modifican el modelo de ensamblaje del dinamómetro y se realizan por medio de relación de posiciones para restringir el movimiento de los elementos en un ensamblaje al modelar el movimiento.

3.18.1 Velocidad angular del neumático al Torque máximo.

La velocidad angular del diferencial que se obtiene del vehículo Great Wall H3 es igual a la velocidad angular que adquirirá el neumático, se transformará en (rad/s).

$$n_{1(diferencial)} = n_{1(neumaticos)}$$

$$W(n_{1(neumaticos)}) = 311.642 \frac{rev}{min} * \frac{2\pi(rad)}{(rev)} * \frac{(min)}{60(s)}$$

$$W(n_{1(neumaticos)}) = 32.635 \frac{rad}{s}$$

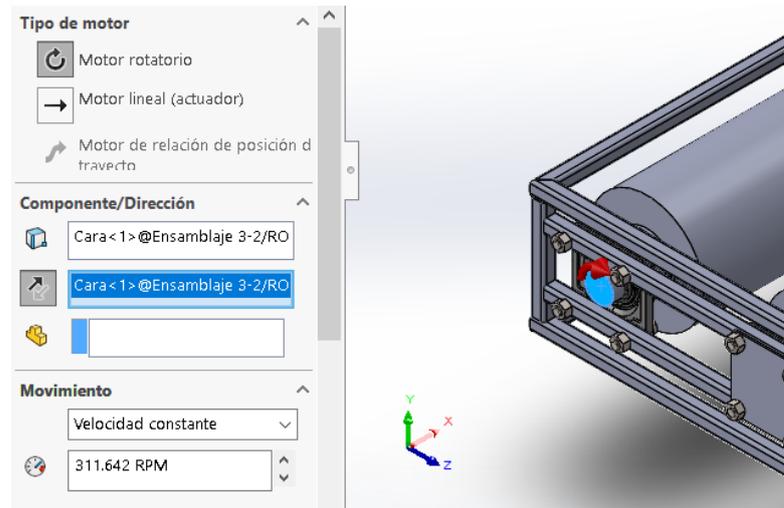
a. Parámetros de simulación

Al momento de realizar la simulación del dinamómetro de rodillos se realiza un estudio de movimiento en el software de simulación CAD, donde se ingresa un

motor rotatorio en el eje del rodillo principal estableciendo la velocidad del diferencial que es igual al de la rueda del vehículo, su valor es de 311.642 rpm.

Figura 47.

Parámetros de simulación para torque máximo.



Nota. El motor rotatorio puede ir ubicado en la cara lateral del eje o en la del rodillo.

3.18.2 Velocidad angular máxima del neumático

Esta es la velocidad que alcanza el neumático del vehículo al utilizar la quinta marcha. Para calcular esta velocidad se utiliza la relación de transmisión de la quinta marcha del vehículo que es de 0.857.

$$R_c = \frac{n_{(motor)}}{n_{5(caja)}}$$

Ecuación 16

Relación de transmisión hacia los neumáticos.

Nota. Tomado de (Soto, 2017)

$$0.857 = \frac{n_{(motor)}}{n_{5(caja)}}$$

$$n_{5(caja)} = \frac{5250 \text{ RPM}}{0.857}$$

$$n_{5(caja)} = 6126.02 \text{ RPM}$$

Para obtener la relación entre la caja y el diferencial se hace uso de la siguiente expresión:

$$R_c = \frac{n_{(caja)}}{n_{5(diferencial)}}$$

$$4.22 = \frac{n_{(caja)}}{n_{5(diferencial)}}$$

$$n_{5(diferencial)} = \frac{6126.02 \text{ RPM}}{4.22}$$

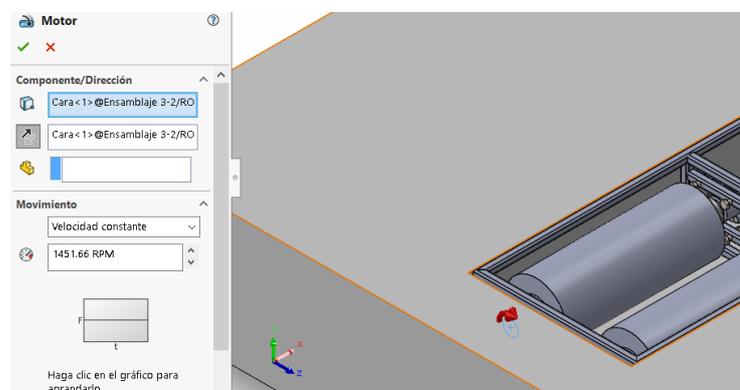
$$n_{5(diferencial)} = 1451.66 \text{ RPM}$$

a. Parámetros de simulación

Al realizar un nuevo estudio de movimiento se aplica la velocidad máxima que alcanza el vehículo, teniendo así:

Figura 48.

Parámetros de simulación máxima velocidad.



Nota. La velocidad se establece en el apartado de movimiento en el software de simulación CAD.

3.18.3 Velocidad crítica del rodillo

Debemos tener en cuenta la velocidad crítica del rodillo, entonces para los cálculos se debe considerar el peso bruto vehicular que se ejerce en los rodillos en el segundo escenario que es el momento donde se realizan los diferentes ensayos.

Para este cálculo se considera la energía cinética, energía potencial y la deflexión vertical del rodillo.

$$E_c = \frac{1}{2} * K * y^2$$

Ecuación 17

Energía cinética.

Nota. Tomado de (Soto, 2017)

$$E_p = \frac{1}{2} * m * V^2$$

Ecuación 18

Energía potencial.

Nota. Tomado de (Soto, 2017)

Dónde:

- E_c = energía cinética
- E_p = energía potencial
- V = velocidad
- m = masa
- y = deflexión
- K = constante del resorte

Aplicando ahora en principio de la conservación de la energía tenemos:

$$Ec_0 + Ep_0 = Ec_f + Ep_f$$

Hay que tener en cuenta que cuando está vibrando la energía cinética es nula, y la energía potencial es máxima, pero cuando la energía cinética es máxima la energía potencial es nula.

$$Ep_{max} = Ec_{max}$$

$$\frac{1}{2}Ky_i^2 = \frac{1}{2}miV^2$$

Ecuación 19

Principio de la conservación de la energía.

Nota. Tomado de (Soto, 2017)

Basándose en el libro de diseño de máquinas de Norton y haciendo una analogía con un resorte se tiene:

$$K = \frac{F}{x}$$

Ecuación 20

Constante del resorte.

Nota. Tomado de (Soto, 2017)

Pero para el caso de los rodillos se hace una comparación el peso con la deflexión, entonces tenemos:

$$K = \frac{w}{y_i}$$

Usando términos de la deflexión y el peso.

$$V = \omega * y_i$$

$$w = m_i * g$$

Dónde:

- K = constante del resorte
- w = peso
- y_i = deflexión enésimo vertical
- ω = frecuencia de oscilación del sistema o frecuencia angular de resonancia rad/s
- m_i = masa enésima en un punto
- g = aceleración de gravedad (m/s²)

Reemplazando los valores y resolviendo la ecuación 19.

$$\frac{1}{2} \frac{m_i * g}{y_i} y_i^2 = \frac{1}{2} m_i * \omega^2 * y_i^2$$

$$m_i * g * y_i = m_i * \omega^2 * y_i^2$$

Despejando ω , tenemos:

$$\omega^2 = \frac{m_i * y_i^2}{m_i * g * y_i}$$

$$\omega = \sqrt{\frac{m_i * y_i^2}{m_i * g * y_i}}$$

La deflexión se obtiene de la simulación de la deflexión del rodillo realizado en un proyecto de investigación anterior, teniendo el valor de $y = 8.91 * 10^{-5} m$, el peso es igual a 10766.475 N, entonces:

$$\omega = \sqrt{\frac{m_1 * y_1^2 + m_2 * y_2^2}{g(m_1 * y_1 + m_2 * y_2)}}$$

$$n_{critica} = \frac{30}{\pi} * \sqrt{\frac{g(m_1 * y_1 + m_2 * y_2)}{m_1 * y_1^2 + m_2 * y_2^2}}$$

$$n_{critica} = \frac{30}{\pi} * \sqrt{\frac{9.81 \frac{m}{s^2} (10766.475 N * y1 + 10766.475 N * y2)}{10766.475 N * y1^2 + 10766.475 N * y2^2}}$$

$$n_{critica} = \frac{30}{\pi} * \sqrt{\frac{9.81 \frac{m}{s^2} (10766.475 N * (8.91 * 10^{-5} m) + 10766.475 N * (8.91 * 10^{-5} m))}{10766.475 N * (8.91 * 10^{-5} m)^2 + 10766.475 N * (8.91 * 10^{-5} m)^2}}$$

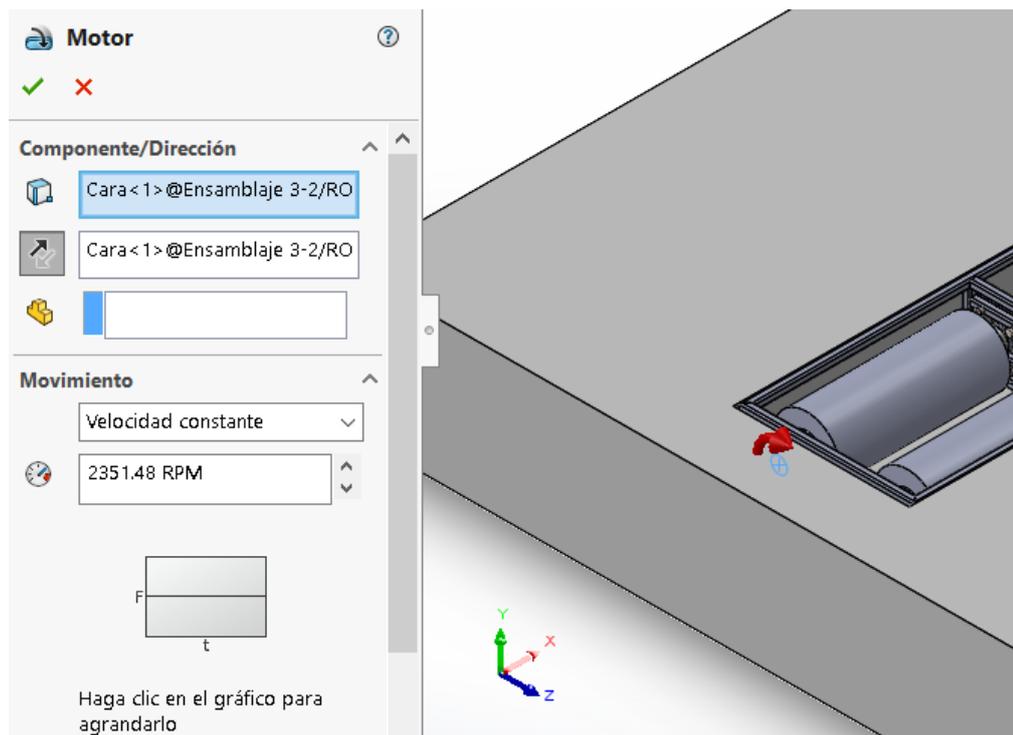
$$n_{critica} = \frac{30}{\pi} * \sqrt{\frac{10.369}{1.71 * 10^{-4}}}$$

$$n_{critica} = 2351.48 \text{ RPM}$$

a. Parámetros de simulación

Figura 49.

Parámetros de simulación para velocidad crítica del rodillo.



Nota. Se establece la velocidad crítica que se calculó para efectos de la simulación.

Capítulo IV

4. Análisis de resultados

Una vez realizada la simulación del movimiento del dinamómetro de rodillos a diferentes regímenes mediante estudios de movimiento en el software de simulación CAD. En el desarrollo del presente proyecto se presentaron diversos problemas debido a las restricciones para los ensamblajes y la limitada capacidad del computador para procesar los gráficos.

El primer problema se presenta al momento de realizar el ensamblaje general de todo el conjunto del dinamómetro de rodillos debido a que se insertan sub-ensambles como el de la unidad de absorción de potencia que no mostraba movimiento de su rotor, esto se debe a que el software supone fijas las piezas y limita sus movimientos. El problema mencionado se soluciona en la pestaña donde se muestran los componentes que componen el ensamblaje general y ubicar el sub-ensamble y convertirlo en un sub-ensamble flexible.

Al concluir en ensamblaje general se realizó los primeros indicios de un estudio de movimiento para verificar que no existan interferencias con las relaciones de posición. Sin tener complicaciones que impidan la simulación de movimiento se procede a realizar los distintos estudios de movimiento, es importante mencionar las condiciones establecidas para cada estudio con el fin de realizar el análisis pertinente a cada estudio.

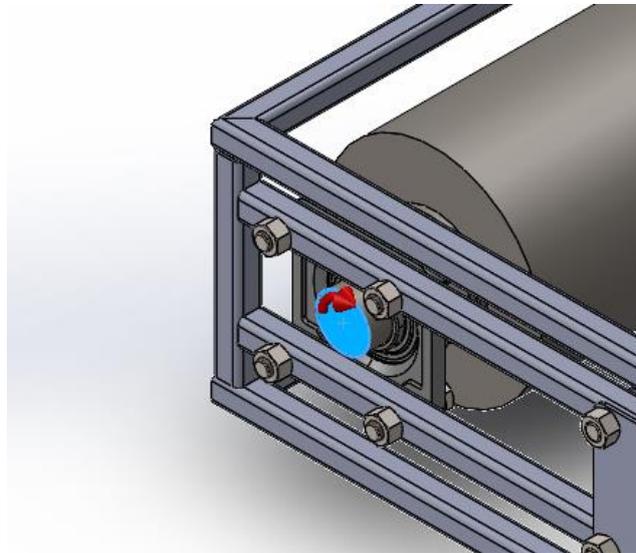
Las simulaciones fueron realizadas determinando una velocidad constante, para el primer análisis se estableció la velocidad en rpm que tendría el neumático del vehículo al alcanzar su torque máximo, el segundo análisis presenta la velocidad máxima que alcanzara el vehículo al utilizar la quinta marcha de la transmisión y el tercer análisis establece un análisis dinámico donde se utiliza la velocidad crítica del rodillo.

4.1 Análisis de movimiento

Una vez establecidas las condiciones del motor rotatorio ubicado en el cilindro principal se procede a determinar la duración del estudio de movimiento para establecer cuanto tiempo trabajará el mecanismo, el tiempo prudente para el análisis será de 5 segundos. Los resultados que se analizarán son la velocidad y aceleración angular que son variables en función del tiempo.

Figura 50.

Ubicación del motor rotatorio.



Nota. Se establecen las condiciones del motor rotatorio ubicado en el cilindro principal.

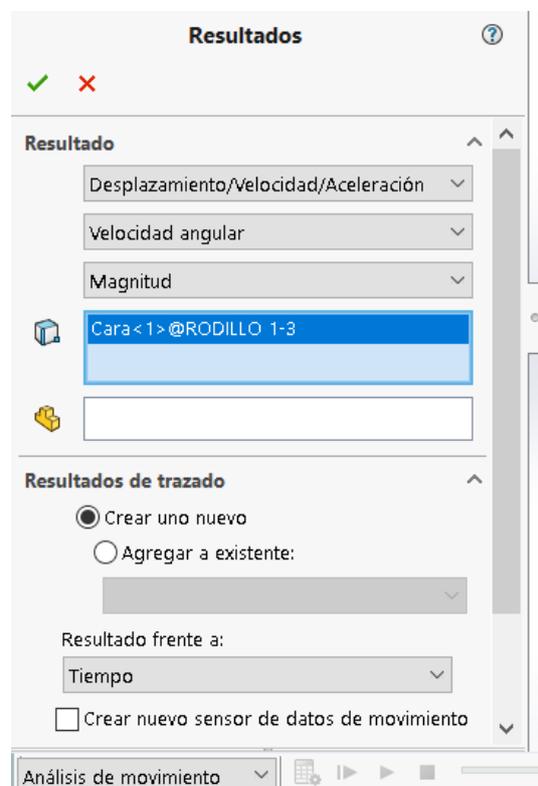
4.1.2 Análisis 1: Velocidad – Torque

Los datos utilizados para este el primer análisis de movimiento son del vehículo Great Wall H3 que genera un torque de 175 Nm a una velocidad de 311.642 rpm en sus neumáticos. Tras realizar el análisis de movimiento se determina la gráfica correspondiente al rodillo principal que refleja la velocidad. Se selecciona la pestaña de resultados y trazados.

En la pestaña de resultados se debe seleccionar la cara lateral del rodillo para obtener la gráfica. La figura 51 muestra los campos de análisis de resultados y como se muestra en el primer apartado se selecciona el análisis de desplazamiento, velocidad y aceleración. El segundo apartado está en función de la anterior y se selecciona la velocidad angular. En la parte inferior se puede elegir la variable que represente los resultados en este caso el tiempo.

Figura 51.

Pestaña de resultados

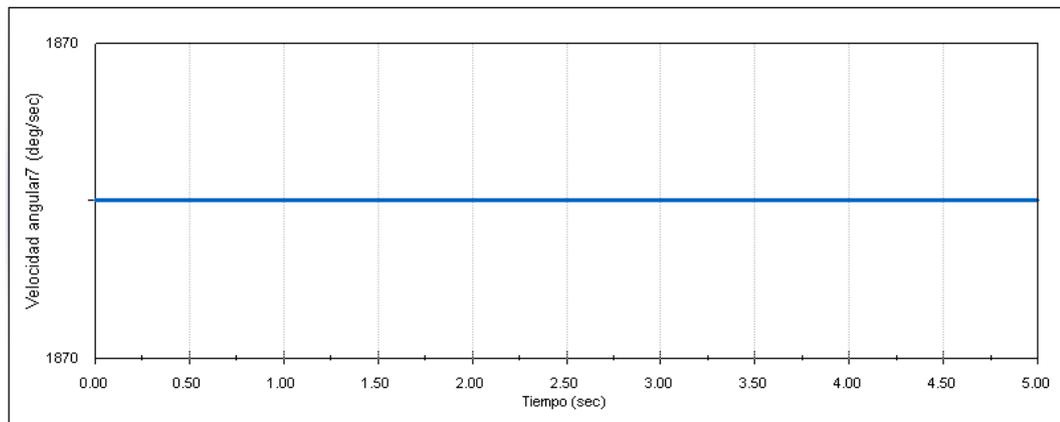


Nota. En el apartado de resultados se establece la velocidad angular.

Establecidas las condiciones, se obtiene la gráfica de la velocidad angular en función del tiempo del conjunto de elementos móviles del dinamómetro. Como se observa la velocidad es una línea recta dando a entender que se estableció una velocidad constante.

Figura 52.

Velocidad angular en torque máximo.

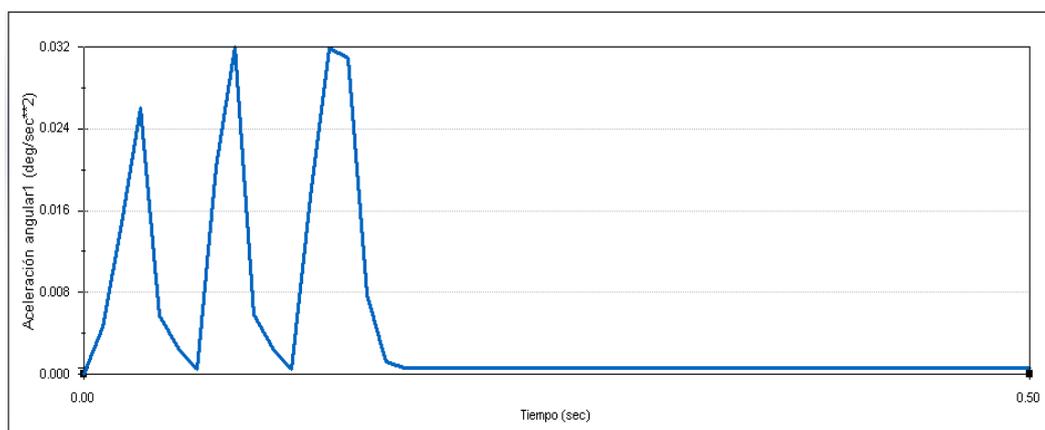


Nota. La velocidad es constante debido a que en el software de simulación no se puede establecer una velocidad variable.

Se puede obtener la gráfica de aceleración en función del tiempo donde se puede observar que se tiene una aceleración instantánea de 0.032 deg/s^2 , no obstante, esta grafica no muestra la aceleración del vehículo al no poder establecer la velocidad variable que pueda incrementar en el tiempo por las limitaciones del software de simulación.

Figura 53.

Aceleración angular en torque máximo.



Nota. La aceleración es instantánea para alcanzar la velocidad establecida.

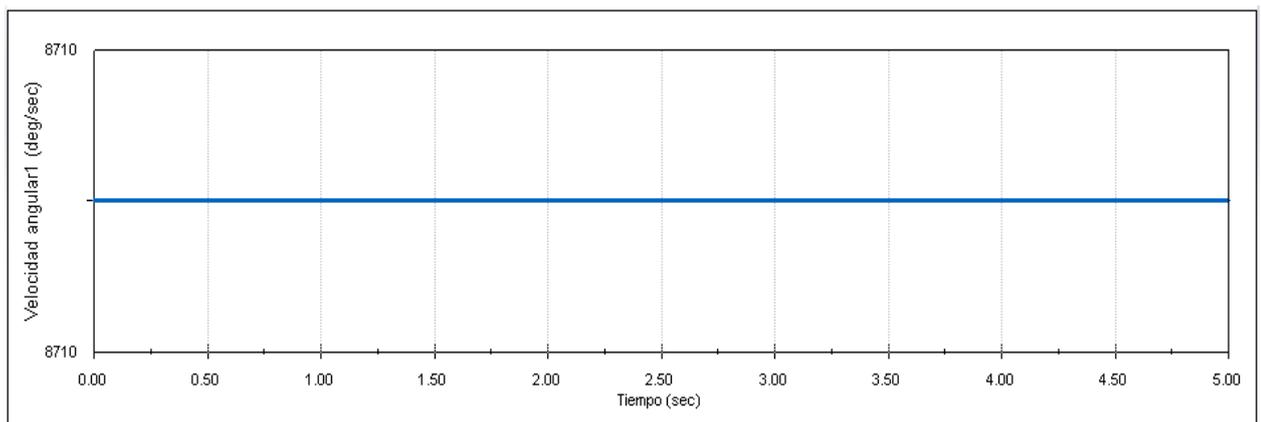
4.1.2 Análisis 2: Velocidad máxima

El análisis de movimiento de la velocidad máxima del neumático al utilizar la quinta marcha del vehículo se obtiene repitiendo el proceso anterior, en este caso al motor rotatorio ubicado en el eje del rodillo se le asigna una velocidad de 1451.66 RPM.

En la siguiente figura se observa la velocidad angular expresada en 8710 deg/s y en función del tiempo, donde se observa una línea recta que representa la velocidad constante que proporcionaría los neumáticos del vehículo a los rodillos.

Figura 54.

Velocidad angular del neumático en quinta marcha.

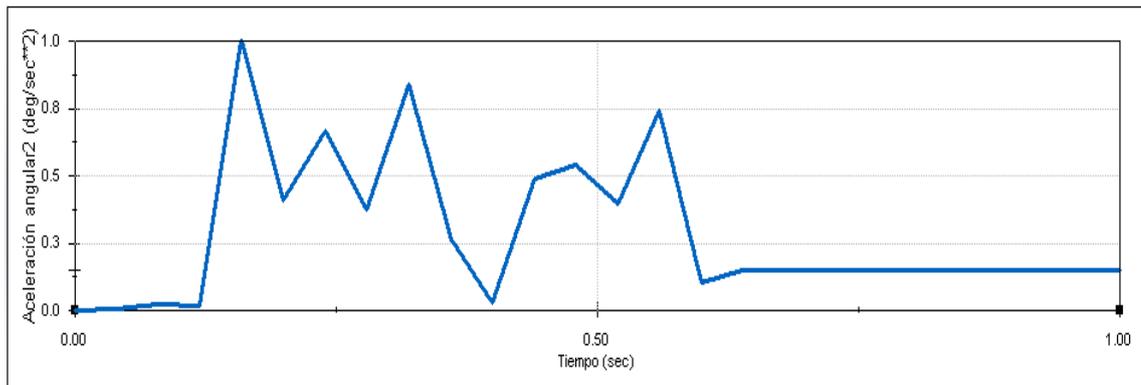


Nota. La velocidad es constante debido a que en el software de simulación no se puede establecer una velocidad variable.

Como en el análisis anterior para efectos de simulación se obtiene una aceleración instantánea para alcanzar la velocidad establecida en los parámetros del estudio de movimiento, como se observa en la gráfica la aceleración llega en su punto más alto a 1 deg/s^2 hasta estabilizarse y anular la aceleración una vez alcanzada la velocidad constante.

Figura 55.

Aceleración angular del neumático en la quinta marcha



Nota. La aceleración es instantánea para alcanzar la velocidad establecida.

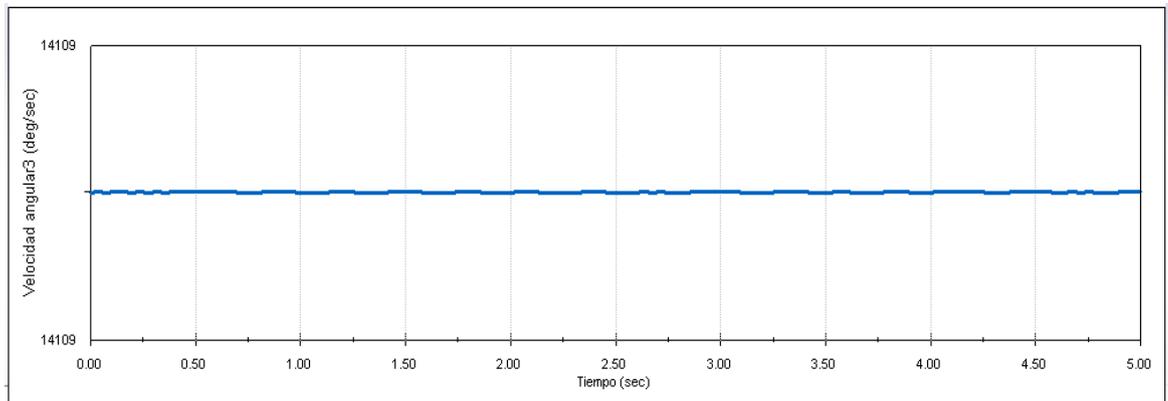
4.1.3 Análisis 3: La velocidad crítica del rodillo

Al calcular la velocidad crítica del rodillo en el anterior capítulo se entiende que su valor es de 2351.48 *RPM*, esta velocidad angular teórica es la que excita la frecuencia natural de un objeto en rotación, indica que a medida que la velocidad de operación del rodillo se acerca a la frecuencia natural del mismo este comienza a resonar lo que aumentara la vibración del conjunto del dinamómetro, puede resultar en la falla del rodillo o alguno de sus elementos acoplados. Por las razones mencionadas es importante conocer la velocidad crítica para garantizar el diseño y aplicar los correctos coeficientes de seguridad.

En la siguiente figura se observa la velocidad crítica del rodillo expresada en 14109 deg/s y en función del tiempo, donde se observa una línea recta que representa la velocidad máxima de operación del dinamómetro de rodillos.

Figura 56.

Velocidad crítica del rodillo.

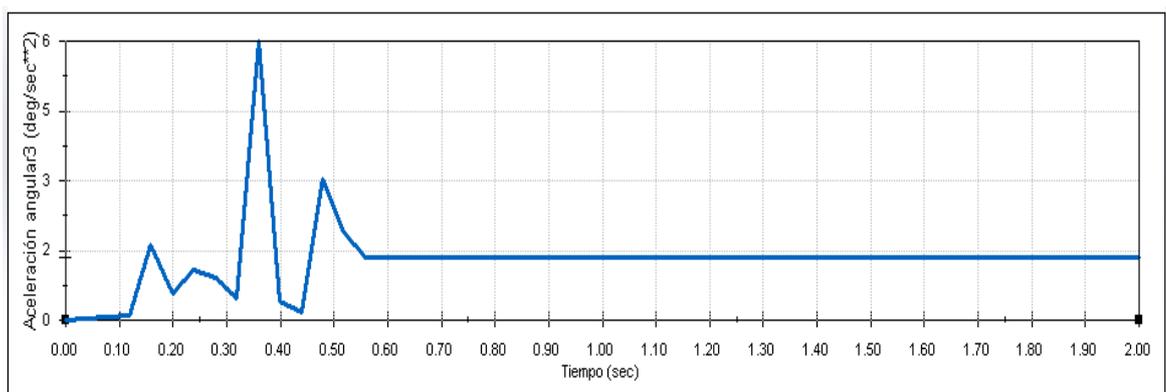


Nota. La velocidad es constante debido a que en el software de simulación no se puede establecer una velocidad variable.

En la gráfica de aceleración angular en función del tiempo se puede observar los picos de aceleración por un periodo aproximado de 0.55 segundos, esto se interpreta como la aceleración angular instantánea que se proporciona al dinamómetro en el estudio de movimiento para efecto de simulación, el valor máximo que alcanza es de 6 deg/s^2 siendo más alto que en las otras simulaciones debido a que debe alcanzar una mayor velocidad angular.

Figura 57.

Aceleración angular de la velocidad crítica



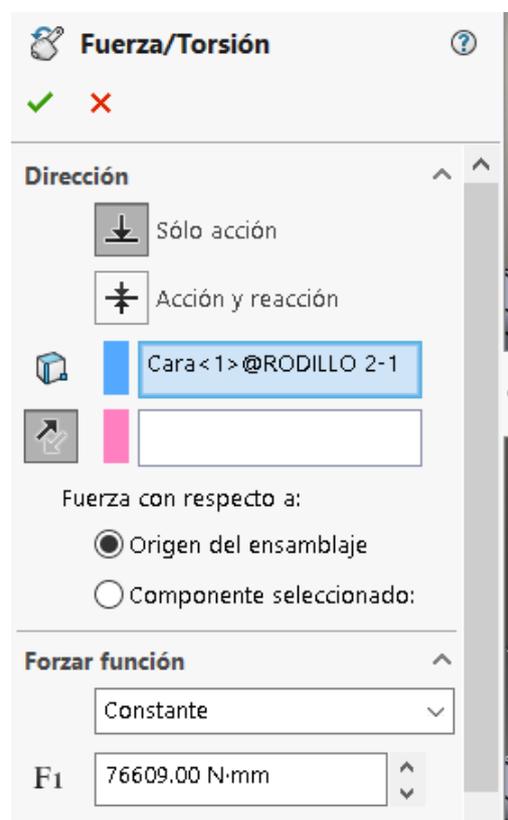
Nota. La aceleración es instantánea para alcanzar la velocidad establecida.

4.1.4 Análisis 4: Simulación de carga de camino

Para esta simulación se utiliza el torque que debe ejercer la unidad de absorción de potencia al conjunto de rodillos con el objetivo de simular la carga de camino, el valor de esta fuerza de torsión es de 76.609 Nm y se debe aplicar a una velocidad de 80 km/h .

Figura 58.

Torque aplicado de carga de camino.



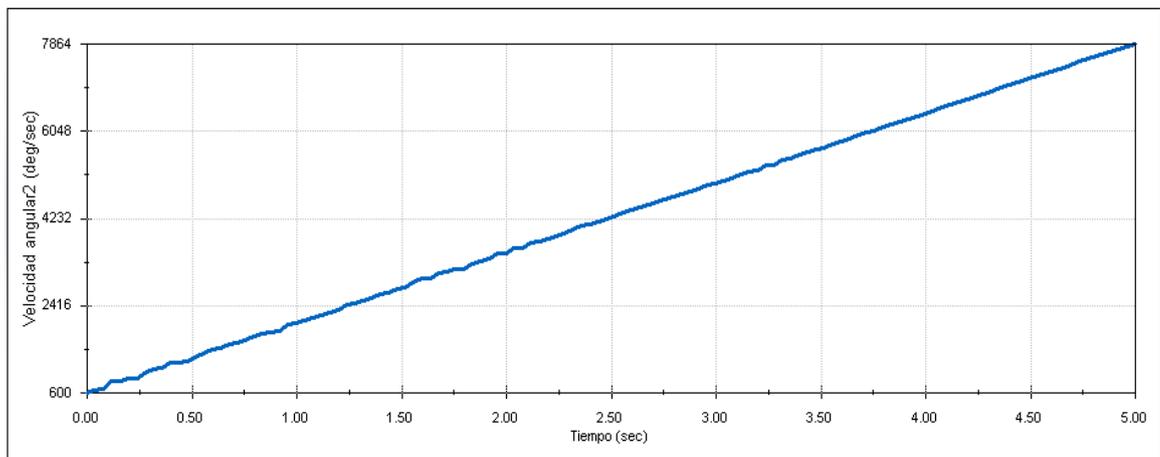
Nota. Fuerza de torsión establecida para simular la carga de camino, ubicada en sentido contrario al giro de los rodillos.

Para analizar esta grafica se debe tener en cuenta que si no hay una aplicación de torque la gráfica de la velocidad angular en función del tiempo sería una línea recta al ser constante como en los análisis anteriores.

Como se observa en la gráfica la velocidad se incrementa a medida que transcurre el tiempo de 5 segundos establecidos para la simulación, esto se debe a que el torque aplicado al ensamble simula la carga de camino, no obstante, interviene de forma inmediata al ejecutar la simulación, esta fuerza frena el conjunto del dinamómetro variando así su velocidad angular hasta alcanzar los 7864 deg/s (1310.32 rpm).

Figura 59.

Velocidad para carga de camino.

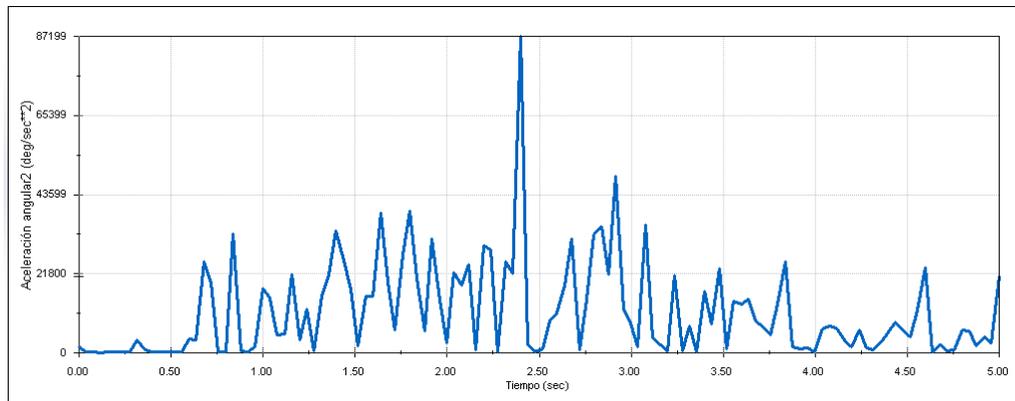


Nota. En la siguiente figura se presenta la variación de la velocidad en función del tiempo.

En la gráfica de aceleración angular en función del tiempo se puede observar que existen picos de aceleración por un periodo de tiempo de 5 segundos, esto se interpreta como la aceleración angular que ejercerían los neumáticos del vehículo a los rodillos con el fin de contrarrestar el freno impuesto por la unidad de absorción de potencia y así alcanzar la velocidad angular de 1310.32 rpm.

Figura 60.

Aceleración para carga de camino.



Nota. La aceleración contrarresta el freno impuesto por la unidad de absorción de potencia.

Capítulo V

5. Conclusiones y recomendaciones

5.1 Conclusiones

- Se realizó el prototipo virtual del dinamómetro de rodillos donde se modeló los distintos elementos móviles y fijos mediante el software de diseño CAD de los cuales se ofrecen los planos. A su vez se realizó el ensamblaje general de los elementos mediante restricciones de movimiento, el mismo que cuenta con sub-ensambles como en el caso de la unidad de absorción de potencia.
- Se calculó la velocidad crítica de los rodillos con el fin de evitar llegar a esas condiciones de operación y producir una frecuencia natural del equipo debido a que entra en resonancia o régimen destructivo donde la carga ejercida por el vehículo por pequeña que resulte podría ocasionar amplitudes muy grandes.
- Se determinaron las condiciones de movimiento del dinamómetro donde se tomaron en cuenta las velocidades de operación donde el vehículo alcanza su mayor torque, la velocidad de los neumáticos al usar la quinta marcha de la transmisión del vehículo y las condiciones de carga de camino.
- Se realizó el análisis de movimiento del dinamómetro de rodillos utilizando el elemento de motor rotatorio para modelar el movimiento del ensamblaje con el propósito de demostrar el comportamiento de los elementos móviles al estar en funcionamiento.

5.2 Recomendaciones

- Asegurarse que la computadora cuente con los recursos necesarios para evitar problemas al momento de realizar el ensamblaje general, puesto que al implementar varios elementos y sub-ensambles existe interferencia con el correcto funcionamiento del software de simulación CAD y menor tiempo de respuesta al realizar el análisis de movimiento.
- Se recomienda realizar correctamente el diseño del rodillo con la justificación fundamentada y comprobada con métodos analíticos de ingeniería puesto que de esto depende el dimensionamiento de los demás componentes que conforman el rodillo.
- Es importante la implementación y prueba en un futuro del prototipo con el fin de verificar el comportamiento al momento de su funcionamiento, con esto se podrá realizar las calibraciones pertinentes con el sistema de adquisición de datos y optimización del diseño presentado.
- Si se requiere un análisis de movimiento donde los parámetros de velocidad sean variables se recomienda hacer uso de otro software de simulación ya que el utilizado en este proyecto solo permite establecer velocidad constante en el motor rotatorio implementado para la simulación de movimiento del dinamómetro de rodillos.

Bibliografía

Amarilla, G. (Mayo de 2006). *accudyno*. Obtenido de

<https://www.accudyno.com/es/ventajas-y-desventajas-de-cada-tipo-de-dinamometro/>

Arnan. (22 de Agosto de 2006). *Epidor*. Obtenido de

https://picupfiles.epidor.com/filesPicup/FILES/NIV_PDF/DEF_NIV_003032_ES_1_ACOPLAMIENTO%20DE%20DISCO_.PDF

Cerecero, M. (2012). *Repositorio Institucional de la UNAM*. Obtenido de

https://www.ri.unam.mx/contenidos/disenio-de-un-dinamometro-de-chasis-para-vehiculos-de-hasta-3500-kg-de-peso-bruto-vehicular-3491255?c=4XAoZ6&d=false&q=*&i=3&v=1&t=search_0&as=0

Cerecero, M. (2012). *UNAM*. Obtenido de

<http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/jspui/bitstream/132.248.52.100/1784/1/Tesis.pdf>

Dokumen. (Junio de 2001). Obtenido de Telma:

<https://dokumen.tips/documents/telma-parts.html>

Dynocom. (2021). *Automotive Software*. Obtenido de

<https://www.dynocom.net/catalog/detail.asp?iPro=120>

Hernandez, V. (Febrero de 2007). *Biblioteca USAC*. Obtenido de

http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_0191_EO.pdf

Hormiga, E. (2013). *DOCPLAYER*. Obtenido de [https://docplayer.es/58405997-](https://docplayer.es/58405997-Diseno-y-construccion-de-un-dinamometro-de-motos-para-la-empresa-jb-soluciones-practicas-de-ingenieria-edinson-omar-hormiga-barrera.html)

[Diseno-y-construccion-de-un-dinamometro-de-motos-para-la-empresa-jb-soluciones-practicas-de-ingenieria-edinson-omar-hormiga-barrera.html](https://docplayer.es/58405997-Diseno-y-construccion-de-un-dinamometro-de-motos-para-la-empresa-jb-soluciones-practicas-de-ingenieria-edinson-omar-hormiga-barrera.html)

Josep. (06 de Julio de 2014). *guemisa*. Obtenido de

<https://www.guemisa.com/sicod/docus/ENCODER-TEC.pdf>

Klimawent. (2021). *Direct Industry*. Obtenido de

<https://www.directindustry.es/prod/klimawent/product-38759-1693743.html>

Lasiom. (31 de Agosto de 2016). *RODAVIGO.S.A.* Obtenido de

<https://rodavigo.net/catalogos/LASIOM/07%20Transmisi%C3%B3n/LASIOM%2011%20Chavetas.pdf>

Montes, V. (2016). *Saenz* . Obtenido de [https://www.saenzdynos.com.ar/bco-rodillos-](https://www.saenzdynos.com.ar/bco-rodillos-freno-camiones.php?lang=es)

[freno-camiones.php?lang=es](https://www.saenzdynos.com.ar/bco-rodillos-freno-camiones.php?lang=es)

Perchín, L. (Octubre de 2014). *UCEM*. Obtenido de [https://e-](https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/22950/PFC_luis_perchin_garcia_2014.pdf)

[archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/22950/PFC_luis_perchin_garcia_2014.pdf](https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/22950/PFC_luis_perchin_garcia_2014.pdf)

Picon, A. (Abril de 2013). *upna*. Obtenido de [https://academica-](https://academica-e.unavarra.es/handle/2454/8883)

[e.unavarra.es/handle/2454/8883](https://academica-e.unavarra.es/handle/2454/8883)

Schwartz. (07 de Marzo de 2020). *LBA Industrial*. Obtenido de

<http://www.lbaindustrial.com.mx/que-es-un-encoder-absoluto/>

Sentronik. (2015). *Celdas de Carga*. Obtenido de [http://celdas-de-carga-tipo-](http://celdas-de-carga-tipos.celdadecarga.com/celda-de-carga-tipo-s-sentronik-7110/)

[s.celdadecarga.com/celda-de-carga-tipo-s-sentronik-7110/](http://celdas-de-carga-tipos.celdadecarga.com/celda-de-carga-tipo-s-sentronik-7110/)

Soto, A. B. (2017). Obtenido de <https://repositorio.umsa.bo/handle/123456789/12119>

Anexos