



Universidad Autónoma de Querétaro

Facultad de Ingeniería



Análisis de fractura en dientes de engranes de transmisiones automotrices mediante vibraciones.

Opción de titulación
Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el título de
Ingeniero en mecánica y automotriz

Presenta:
Mariana Zuñiga Uribe

Dirigido por:
Dr. Juan José Saucedo Dorantes

Campus San Juan del Río, San Juan del Río, Qro.
Julio, 2023



Dirección General de Bibliotecas y Servicios Digitales
de Información



Análisis de fractura en dientes de engranes de
transmisiones automotrices mediante vibraciones.

por

Mariana Zuñiga Uribe

se distribuye bajo una [Licencia Creative Commons
Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0
Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

Clave RI: IGLIN-262811



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Campus San Juan del Río



Análisis de fractura en dientes de engranes de transmisiones automotrices
mediante vibraciones.

TESIS

Como parte de los requisitos para obtener el título de
INGENIERO MECÁNICO Y AUTOMOTRIZ

Presenta:

Mariana Zuñiga Uribe

Dirigido por:

Dr. Juan José Saucedo Dorantes

SINODALES:

Dr. Juan José Saucedo Dorantes
Presidente

Dr. Roque Alfredo Osornio Ríos
Secretario

Dr. David Alejandro Elvira Ortiz
Co- asesor

M. en C. Alejandro García Basurto
Vocal

Firma

Firma

Firma

Firma

Campus San Juan del Río, San Juan del Río, Qro.
Julio, 2023

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma de Querétaro, que durante los últimos años fue como otra casa para mí, que me ayudó a crecer tanto profesionalmente como personalmente y en mí estaba dentro de esta casa de estudios conocí personas que siempre aportaron una enseñanza en mi vida.

A la coordinación de la carrera de Mecánica y Automotriz que desde que llegue a Campus San Juan me dio la bienvenida, al Dr. Ángel Pérez Cruz, que siempre se mantuvo al pendiente de mi desarrollo y me tomó en cuenta para algunos proyectos de la escuela, además de otorgarme la Beca Proyecto de Investigación (29361) del Proyecto: FIN202201.

A mi director de tesis el Dr. Juan José Saucedo Dorantes, por todo su apoyo durante el desarrollo de la tesis, sus observaciones, su tiempo invertido tanto en el desarrollo práctico como en las revisiones del documento, su confianza, comprensión y por alentarme a seguir creciendo de manera profesional, me enseñó que un profesor no solo te apoya en el aula de clases, sino que se preocupa de que alcances tus metas, añadiendo a todo lo anterior me apoyo brindándome la Beca Fondo para el Desarrollo del Conocimiento bajo el proyecto: 20205007071601.

Al Dr. Roque Alfredo Osornio Ríos, Dr. David Alejandro Elvira Ortiz y al M. en C. Alejandro García Basurto, que además de ser mis sinodales y en todo momento haber hecho un espacio en su tiempo para aconsejarme y revisar mi trabajo, fueron excelentes profesores que me enseñaron en su momento el valor de la disciplina, constancia y perseverancia.

Finalmente, a los amigos que siempre estuvieron alentándome, aconsejándome y explicando las dudas que tenía, Javi, David y Angelo.

DEDICATORIAS

Primeramente, a Dios, porque puso las condiciones y las personas correctas en mi camino.

A mis padres, que me quedo corta de palabras con todo lo que me han dado, su esfuerzo a diario para sacarme a mí y a mis hermanos adelante, porque todos los días pude irme desayunada a la escuela ya que ellos estaban trabajando por ello, por su amor incondicional, sus palabras de apoyo, paciencia, por su frase “todo pasa por algo” tanto en condiciones felices como en difíciles, por los valores que se me siguen inculcando, los amo papis.

A mi hermano mayor, Ricardo, por todas esas veces que recorrió muchos kilómetros de casa a la universidad, por abrazarme, para ayudarme con las mudanzas y hasta para traerme trabajos o llaves.

A mi esposo, porque este último año ha sacrificado su tiempo después del trabajo para apoyarme a que yo termine con este trabajo, por instarme a que siga creciendo, por su paciencia y por su amor.

Y, por último, a el regalo más grande que me mandó Dios, mi bebé Santiago. La persona que más me inspira a ser una mejor versión de mi a diario, porque sus sonrisas son gasolina para no parar y por él y para él es todo mi esfuerzo.

Tabla de contenido

Capítulo 1	9
1.1 Introducción.....	9
1.2 Antecedentes	10
1.2.1 Fallas más comunes en engranes	10
1.2.2 Técnicas para detección de falla en engranes.....	11
1.3 Objetivo	12
1.3.1 General.....	12
1.3.2 Particulares.....	12
1.4 Descripción del problema	13
1.5 Justificación.....	14
1.6 Planteamiento general.....	15
Capítulo II	17
2 Fundamentación teórica	17
2.1 Engranes.....	17
2.2 Transmisiones automotrices	23
Capítulo III	35
3 Metodología.....	35
3.1 Elección de engrane	36
3.2 Inducción artificial del fallo	40
3.3 Creación del banco experimental.....	41
3.4 Instrumentar una transmisión automotriz, mediante la instalación de acelerómetros.....	42
3.5 Adquisición de señales.....	43
3.6 Realizar pruebas experimentales de cada una de las severidades seleccionadas.....	45
3.7 Procesamiento de las señales de vibración adquiridas.....	47
Capítulo IV	51
4 Resultados.....	51
4.1 Inducción artificial del daño	51
4.2 Adquisición de datos sin procesamiento	52
4.3 Adquisición de datos con procesamiento de la señal.....	55

Capítulo V..... 67
 5.1 Conclusiones..... 67
 5.2 Prospectivas..... 68
Capítulo VI..... 69
 Referencias..... 69

Índice de Figuras

Figura 1. Planteamiento general de la investigación.

Figura 2. Engrane recto (Budynas y Nisbett, 2008).

Figura 3. Engrane helicoidal (Budynas y Nisbett, 2008).

Figura 4. Engranajes cónicos (Budynas y Nisbett, 2008).

Figura 5. Engrane de tornillo sinfín o gusano (Budynas y Nisbett, 2008). Figura 6. Engrane con desgaste en sus dientes (Espejo y Martínez, 2008).

Figura 7. Diente con falla por fatiga superficial (Espejo y Martínez, 2008).

Figura 8. Diente con falla por flujo plástico (Espejo y Martínez, 2008).

Figura 9. Diente con falla por fractura (Espejo y Martínez, 2008).

Figura 10. Bomba hidráulica Rotoplas (Rotoplasmx, 2019).

Figura 11. Reductor de velocidad (Energía Controlada de México, 2023).

Figura 12. Diferencial (Bardahl, 2021).

Figura 13. Caja de velocidades manual (Plaza, 2020).

Figura 14. Transmisión manual (Toda la información sobre transmisiones automáticas, 2022).

Figura 15. Caja de cambios manual KIA para coches híbridos ligeros (Fernández, 2020).

Figura 16. Sincronizadores con corrosión (Foro coches, 2014).

Figura 17. Identificación de valores de voltaje en onda senoidal (Electrónica Unicrom, 2015).

Figura 18. Señal discreta (Gómez, 2020).

Figura 19. Señal discreta con un intervalo finito (Gómez, 2020).

Figura 20. Espectro de vibración típico de una caja de engranajes en condición saludable (Saucedo et al., 2016).

Figura 21. Espectro de vibración típico de una caja de engranajes con desgaste uniforme (Saucedo et al., 2016).

Figura 22. Diagrama de bloques de la metodología.

Figura 23. Imagen de apoyo para entender el proceso de desarmado (Nissan D21 Manual Transmission Rebuild Kit,2023).

Figura 24. Transmisión Nissan D21 abierta.

Figura 25. Diente de engrane con pequeño fallo por fractura.

Figura 261. Transmisión automotriz manual en la reversa (a) y 5ta velocidad (b).

Figura 27. (a) Engrane en estado sano, (b) engrane con excentricidad.

Figura 28. Planteamiento de la fractura artificial del diente del engrane.

Figura 29. Banco experimental (a) Base para montar el motor, (b) corte en perfiles Bosch (c) Arreglo entre motor y caja de velocidades.

Figura 30. Transmisión automotriz instrumentada.

Figura 31. Colocación de los acelerómetros y plano que se estableció.

Figura 32. Centro de adquisición de datos.

Figura 33. Programación de bloques para adquisición de datos.

Figura 34. Diagrama de fases del código para procesamiento en el dominio de la frecuencia.

Figura 35. Diagrama de transmisión automotriz manual Nissan D21, en quinta marcha.

Figura 36. Fractura de diente en engrane (a) toma frontal y (b) toma isométrica.

Figura 37. Señal sin procesamiento del engrane a frecuencia de trabajo 30Hz.

Figura 38. Señal de engrane sano sin procesamiento a una frecuencia de trabajo de 30Hz (eje y).

Figura 39. Señal de engrane con diente fracturado sin procesamiento a una frecuencia de trabajo de 30Hz (eje y).

Figura 39. Señal sin procesamiento del engrane sano a frecuencia de trabajo 60Hz (eje x).

Figura 40. Señal de engrane sano sin procesamiento a una frecuencia de trabajo de 60Hz (eje y).

Figura 41. Señal de engrane con excentricidad sin procesamiento a una frecuencia de trabajo de 60Hz (eje x).

Figura 42. Señal de engrane con excentricidad sin procesamiento a una frecuencia de trabajo de 60Hz (eje y).

Figura 43. Valor Rms en una frecuencia de trabajo de 30Hz (eje x).

Figura 44. Valor Rms en una frecuencia de trabajo de 30Hz (eje y).

Figura 45. Valor Rms en una frecuencia de trabajo de 40Hz (eje x).

Figura 46. Valor Rms en una frecuencia de trabajo de 40Hz (eje y).

Figura 47. Valor Rms en una frecuencia de trabajo de 50Hz (eje x).

Figura 48. Valor Rms en una frecuencia de trabajo de 50Hz (eje y).

Figura 49. Valor Rms en una frecuencia de trabajo de 60Hz (eje x).

Figura 50. Valor Rms en una frecuencia de trabajo de 60Hz (eje y).

Figura 51. Espectros de vibración del experimento con el variador de frecuencia a 30Hz (eje x).

Figura 52. Espectros de vibración del experimento con el variador de frecuencia a 30Hz (eje y).

Figura 53. Espectros de vibración del experimento con el variador de frecuencia a 40Hz (eje x).

Figura 54. Espectros de vibración del experimento con el variador de frecuencia a 40Hz (eje y).

Figura 55. Espectros de vibración del experimento con el variador de frecuencia a 50Hz (eje x).

Figura 56. Espectros de vibración del experimento con el variador de frecuencia a 50Hz (eje y).

Figura 57. Espectros de vibración del experimento con el variador de frecuencia a 60Hz (eje x).

Figura 58. Espectros de vibración del experimento con el variador de frecuencia a 60Hz (eje y).

Capítulo 1

1.1 Introducción.

En la actualidad, y desde tiempos antes de Cristo, el método de transmisión de potencia que se conoce es aquel basado en un par de engranes conectados entre sí, engranajes, que eran capaces de aumentar o disminuir velocidad, así como torque y potencia. Hoy en día, este método ha sido mejorado dando mayores propiedades a los engranes o innovando tecnológicamente la distribución de estos dentro de un sistema, pero por desgracia a pesar de estos avances siguen existiendo fallas, y esto resulta un problema dado a que estos componentes forman parte de muchas cosas alrededor, su funcionamiento se ve desde un reloj hasta maquinaria especializada de la industria.

A pesar de los avances tecnológicos que se han tenido respecto a las máquinas de transmisión de potencia, en las empresas se sigue solicitando los servicios de técnicos en mantenimiento por fallas ocasionadas debidas a componentes de las mismas máquinas. Es por esto que resulta de gran importancia que se realicen análisis constantes del funcionamiento de los sistemas de transmisión de potencia en máquinas tanto de gran escala como las que no lo son, para así no tener que realizar mantenimientos correctivos sino hacer mantenimiento tipo predictivo, evitando de esta forma que haya paros inesperados en las máquinas ocasionando costos extra por los repuestos, por la mano de obra y, claro, con tiempos de inactividad de producción. Por ello, resulta de interés el aprovechar los métodos que se utilizan para detectar fallas en máquinas rotatorias y enfocarnos en resolver problemas que afectan a la sociedad, por ejemplo, fallas dentro de los automóviles. Siendo más específicos, fallas en las cajas de transmisión, que pueden ser ocasionadas por factores como la lubricación, algún factor eléctrico o por componentes dañados por el tiempo o la falta de mantenimiento. Este trabajo está enfocado en una falla en particular, fractura de diente del engrane dentro de transmisiones automotrices, eligiéndose esta falla por la repercusión que tiene esta falla en el estado del auto, siendo que, si algún engrane deja de cumplir su función se ve afectada la transferencia de energía, la velocidad, el torque y hasta puede resultar poco confortable ya que un engrane dañado genera ruido dentro de la caja de transmisión.

El contenido de este trabajo se encuentra dividido en toda la parte teórica que ya existe o que se justifica con hechos del pasado o actuales, díganse, por ejemplo, los antecedentes, la justificación, descripción del problema, fundamentación teórica, etc.; y en la parte que aporta algo nuevo, que es la detección de fractura en dientes de engrane en transmisiones automotrices mediante el análisis de vibraciones, esto siendo explicado desde la metodología, las pruebas que se realizarán, un proceso que pueda ser repetido por alguien más y la conclusión a dicho proyecto, reportando si se logró el objetivo, se encontró otro, o si no se logró. Finalmente, en la última sección de este documento se encontrarán las referencias bibliográficas utilizadas para este proyecto.

1.2 Antecedentes

Hoy en día, los vehículos automotores forman parte de muchas actividades cotidianas, siendo de suma importancia que estas unidades trabajen de manera adecuada. Un área de investigación para poder cumplir con ello, son las estrategias de mantenimiento en equipos de transmisión de movimiento, tales como lo son las transmisiones automotrices, teniendo como finalidad distintos objetivos, entre los más destacados se encuentra el preservar la seguridad del usuario y de la máquina misma, así como alargar la vida útil de esta última; y la elección de que método se utilizará es de suma importancia, ya que dependiendo de este se tendrá, o no, un impacto significativo en el logro de los objetivos ya mencionados. Por ello al realizar una investigación bibliográfica referente al tema, se clasifica en dos secciones: en la primera sección se revisan las fallas más comunes en engranes, y en la segunda sección se hace un análisis de las técnicas para monitorear las señales generadas por los engranes para la detección de fallas.

1.2.1 Fallas más comunes en engranes

Los sistemas de transmisión de potencia pueden verse afectados por la aparición de diferentes anomalías o condiciones de falla que afectan su operación, en este sentido, se debe considerar cuáles son estas fallas existentes, para así poder dar un diagnóstico a tiempo. Las fallas en engranes se pueden presentar en 5 tipos distintos, según Benítez (1985), estos pueden ser: por desgaste, flujo plástico, fatiga superficial, fractura y por combinación de las anteriores. La falla por desgaste ocurre cuando la superficie de los dientes de un engrane se mecaniza o pule en servicio, según Espejo y Martínez (2008),

así como la falla por flujo plástico sucede cuando se forman olas o escamas perpendiculares a la dirección de desplazamiento. Mientras que la falla por fatiga superficial Díaz (2014) describió como resultado causado por someter la pieza a cargas cíclicas, siendo dichas cargas generalmente inferiores al límite elástico del material, demasiado bajas para provocar la fractura instantánea de la pieza, pero con la suficiente capacidad para agrandar las grietas inherentes en el material a través de repetidos ciclos y la falla por fractura es la consecuencia de sobrecargar al elemento o de someterlo a cargas cíclicas por encima del límite de fatiga del material. Además de definir las fallas que ocurren en los engranes Díaz (2014) en su trabajo propone un prototipo que ayude a detectar las fallas en los engranes con ayuda de un programa computacional. Esto lo hace por medio de una base de datos con las características de los engranes cuando están dañados, el usuario ingresa los síntomas y se determina la falla. Pero no solo existe este tipo de detección de falla, los hay también por Análisis por Elemento Finito (FEM- Finite Element Method) y por medio del análisis de señales de vibración. A lo largo de los años, se ha ido puliendo la técnica de análisis de señales de vibración como método de detección de fallas, por ejemplo, Cadina (2011) empleó la variabilidad estocástica para la identificación y tipificación de distintos tipos de fallos en rodamientos, cajas reductoras y eje, se logró detectar los fallos en máquinas rotativas; un caso parecido, fue el de Pacheco et al. (2019) con la búsqueda del grado de severidad de las máquinas rotativas. Y no solo se reduce a máquinas rotativas, Hernández (2018) propuso usar el análisis de vibraciones para detectar fallas en aerogeneradores de baja potencia, por medio de La Transformada del paquete de Wavelet (WP-Wavelet Packet).

1.2.2 Técnicas para detección de falla en engranes

Por otro lado, anteriormente ya se han realizado algunos trabajos enfocados a la detección de fallas en sistemas de transmisión con engranes, y en cuanto las técnicas utilizadas para la detección de fallas diversos autores han mostrado su punto de vista para realizar esta tarea, por ejemplo, Camacho et al. (2009) diseñaron y modelaron una caja de reducción y transmisión usando FEM. Posteriormente, Saucedo (2014) encontró que se puede hacer un análisis del desgaste de engranes aplicando el método de FEM, y así demostró que el cambio de masa ocasionado por desgaste afecta la frecuencia natural y la operación dentro de una caja de engranes, además concurre con sus

antecedentes, en cuanto a que el método de elemento finito es una opción más económica y menos invasiva.

De otra manera, por medio de la instrumentación de sensores y el procesamiento digital de señales del Ángel (2014) demostró que era posible detectar el grado de daño en engranes de una caja reductora. Otro trabajo es el de Chingal et al. (2019) quienes compararon las señales de vibración y corriente de un motor de inducción para la detección de la severidad de fallos en engranes; y aportando un poco más a este método de detección de fallas en engranes Pacheco et al. (2019) analizaron las emisiones acústicas para detectar el grado de severidad en dicho engrane. Finalmente, Loaiza (2021) desarrolló un método para la detección y diagnóstico de fallos en caja de engrane, utilizando un algoritmo basado en similitud difusa.

Cabe mencionar que este trabajo representa la primera investigación, enfocada a la identificación de fallas de los engranes en sistemas de transmisión automotrices mediante el procesamiento de señales de vibración, dentro de la UAQ.

1.3 Objetivo

1.3.1 General.

Inducir diferentes condiciones de falla en un engrane mediante procesos de maquinado para su detección mediante el procesamiento de señales de vibración en una transmisión automotriz.

1.3.2 Particulares.

- Analizar las causas y efectos que produce el fallo de fractura en dientes de engrane mediante la revisión de la literatura para la selección de las severidades a inducir en el engrane.
- Detectar si existe en la caja de transmisión a estudiar algún engrane con el daño buscado, en caso contrario, inducir artificialmente el fallo de fractura de diente en un engrane, mediante procesos de maquinado, posiblemente con herramientas dentro del taller de automotriz, para el estudio de las vibraciones que produce en una transmisión automotriz.
- Instrumentar una transmisión automotriz mediante la instalación de acelerómetros para realizar la adquisición de señales de vibración.

- Realizar pruebas experimentales de cada una de las severidades de fallo seleccionadas, mediante sensores, para la obtención de una base de datos.
- Procesar las señales de vibración adquiridas mediante técnicas del dominio del tiempo y dominio de frecuencia para determinar los efectos que la factura de diente en engranes produce en una transmisión automotriz.

1.4 Descripción del problema

Existen distintos tipos de daño en el engrane, como lo son: desgaste de diente, picadura, gripado y fractura de diente. Siendo esta última la más riesgosa dentro de la caja por los daños que puede ocasionar a los demás componentes, por ello se plantea su pronto diagnóstico.

Dentro de la industria, casi siempre las cajas de transmisión se encuentran cerradas, ya sea para que no se escape el lubricante o para evitar la mayor cantidad de ruido generado por estas, lo cual se traduce en un difícil acceso para la toma de muestras directas en los engranes del sistema. Para analizar los fallos ocurridos dentro de este sistema entonces, es requerido el monitoreo de las señales generadas por vibración, pero, aunque ya hay antecedentes de detección de fallas por medio de vibraciones, el precedente dentro de cajas de transmisión no ha sido muy estudiado, lo que lleva a pensar que con mayor toma de datos en esa área el aumento de detección de fallas en la transmisión sería posible.

El número de casos que presentan fallo en la transmisión se encuentra en la cuarta posición a nivel nacional dentro de las fallas más comunes en un vehículo automotriz (Lira, 2020), demostrando que este problema es más común de lo que se podría pensar. Siendo este el caso, la transmisión es uno de los sistemas más costosos de reparar, y aunque sea un solo engrane el que necesita un cambio, el hecho de que se tiene que abrir el sistema, que está cerrado de manera hermética, para su remplazo, hace que se eleve el costo de reparación por tratarse de una actividad más compleja para el técnico en mantenimiento.

1.5 Justificación

En lo que concierne a México, circulan poco más de 44.9 millones de vehículos según datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2019), alrededor de 378 mil 504 siniestros automovilísticos, anualmente, fueron registrados en la Alianza Nacional por la Seguridad Vial (ANASEVI) desde 2015 y la asociación Mexicana de Instituciones de Seguros estima que cada día en el país hay más de 14 mil hechos de tránsito. Muchos de estos accidentes mencionados causaron heridas de gravedad u hospitalizaciones. Aproximadamente existen cada año 16 mil muertes por accidentes de tránsito en México (Arellano, 2021), y de acuerdo con información de la Comisión Nacional de Seguridad (CNS, 2015), las causas principales de estos accidentes automovilísticos corresponden en 80% al conductor, 7% al estado del vehículo, 9% a agentes naturales y 4% al camino. Del porcentaje correspondiente a fallas por estado del vehículo, 7.5% fueron causados por un fallo en la transmisión (Lira, 2020).

Como futuros ingenieros se debe cumplir con la responsabilidad el ocuparse de que estos números poco a poco sean menores. Por ello la primera justificación de esta tesis es que se aportará conocimientos para que la población tenga una solución real en el diagnóstico preventivo de fallas por fractura en dientes de engranes, dentro del automóvil.

En favor de salvaguardar el propósito y diseño de la transmisión misma, se necesita que esta no sea abierta cada que se sospeche de una falla en su interior por ello es importante que se estudie como lograr detectar fallas cuando la transmisión automotriz está en funcionamiento, además, esta investigación podría verse encaminada al desarrollo de un aparato que funcione en línea, de manera intuitiva para que todo usuario de vehículos con transmisión estándar sea capaz de realizar un diagnóstico en sus máquinas, y así, prevenir accidentes de esta índole.

Se encuentra también la justificación por el aspecto económico, con este tipo de análisis se permite realizar mantenimiento del tipo predictivo, es decir, se evitará que existan paradas no programadas del vehículo. Finalmente, dentro de las justificaciones más importantes, está el hecho de que se trata de un método de investigación no invasivo para la caja de transmisión, que a pesar de estudiar un elemento de la parte interior, no será necesario abrir la caja de transmisión una vez comprobado que este método

funciona; además, será el desarrollo de una base de datos que permitirá tener un registro de este tipo de fallas, los cuales puedan ser después reconfigurables para llevar a cabo el monitoreo de cajas de transmisión automovilística.

1.6 Planteamiento general.

Para entender esta sección del planteamiento general de la investigación, se presenta el siguiente diagrama, mostrado en la Figura 1, donde se puede observar en un flujo de izquierda a derecha los pasos a seguir para el desarrollo de la investigación. El primer bloque hace referencia a la revisión de la caja para elegir el engrane que se utilizará para estudiar y posteriormente inducir el fallo de fractura en un diente por herramienta de percusión. Después se instalará en la transmisión automotriz sensores acelerómetros para la adquisición de datos con ayuda de equipo y software de NI ® (National Instruments).

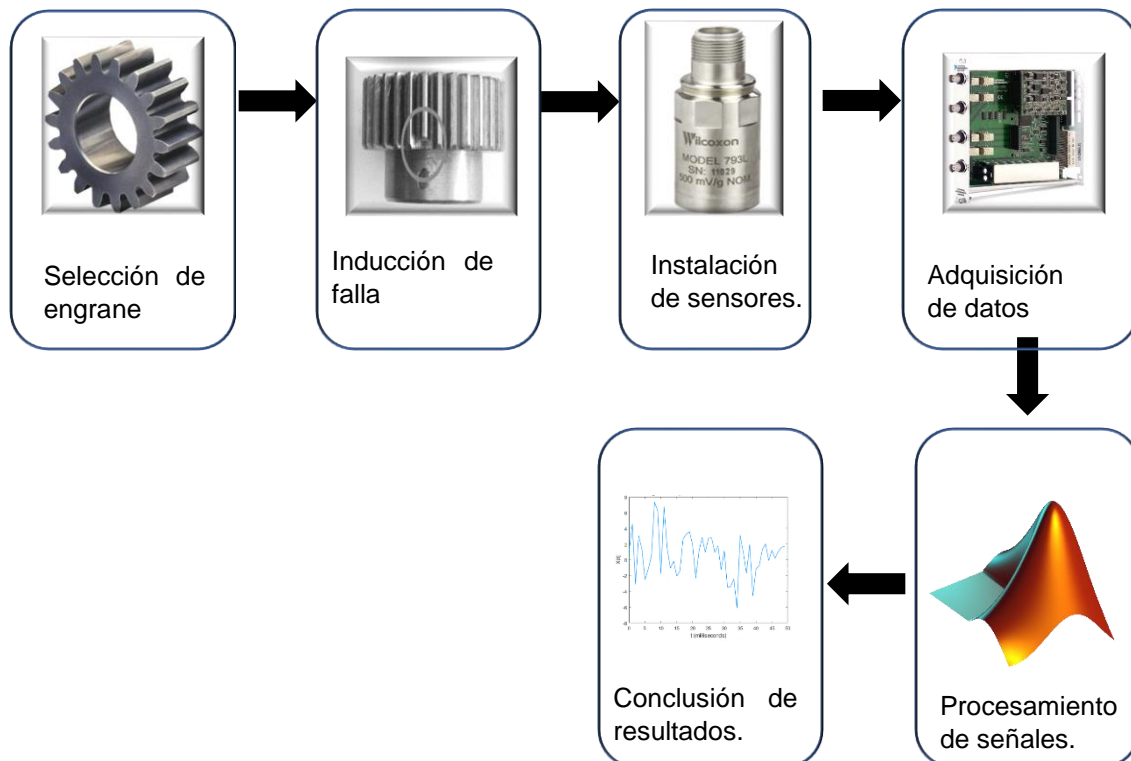


Figura 1. Planteamiento general de la investigación.

Posterior a ello se procesará las señales con Matlab para así analizar las señales en el dominio del tiempo y de la frecuencia, buscando comprobar que la falla por diente fracturado en engrane, dentro de la caja, causa repercusiones en la señal de vibración,

con esta investigación se podrá visualizar si esta falla afecta o no el funcionamiento de una transmisión automotriz, además de aportar otra línea de investigación de la Universidad.

Capítulo II

2 Fundamentación teórica

En esta parte de la tesis se revisan los conceptos que envuelven el tema y las técnicas que se han utilizado a lo largo del tiempo para el análisis de fallos mediante vibraciones hasta el día de hoy, los temas que se tienen que tratar como parte del desarrollo del proyecto son los engranes, ya que están directamente relacionados con el título de este protocolo; también se debe de mencionar los tipos de transmisiones para encaminar al lector a la transmisión que se utilizará, así como sus fallos, para finalmente relacionar los dos temas: engranes y fallos en transmisión. Para finalizar con esta sección se dará detalles del método que se usará para el procesamiento de la señal, La Transformada de Fourier.

2.1 Engranes

Los engranes forman parte de la vida del hombre desde tiempos muy antiguos, se ha demostrado que desde el siglo II a.C se fabricaban engranes de bronce, aunque no se aporta mucha información de para qué se usaban en esos tiempos, aunque puede ser que al igual que hoy en día, haya sido para transmitir movimiento, pero ¿Qué es un engrane? se denomina engrane o ruedas dentadas al mecanismo utilizado para transmitir potencia de un componente a otro dentro de una máquina (del Castillo, 2013).

2.1.1 Tipos de engrane

El campo de los engranes es bastante extenso, y una manera de clasificarlos es la que se muestra a continuación:

Los engranes rectos (Figura 2) tienen dientes paralelos al eje de rotación y se emplean para transmitir movimiento de un eje a otro eje paralelo. De todos los tipos, el engrane recto es el más sencillo, razón por la cual se utiliza para desarrollar las relaciones cinemáticas básicas de la forma de los dientes.

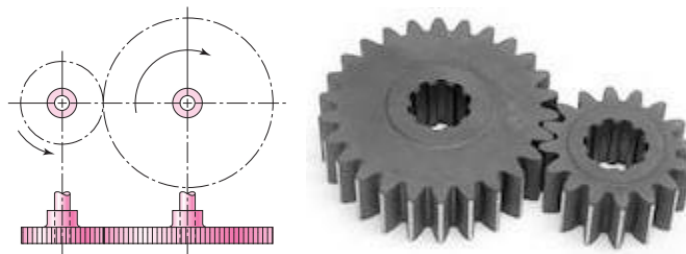


Figura 2. Engrane recto (Fuente: Budynas y Nisbett, 2008).

Los *engranes helicoidales* (Figura 3) poseen dientes inclinados con respecto al eje de rotación, y se utilizan para las mismas aplicaciones que los engranes rectos y, cuando se utilizan en esta forma, no son tan ruidosos, debido al engranado más gradual de los dientes durante el acoplamiento. Asimismo, el diente inclinado desarrolla cargas de empuje y pares de flexión que no están presentes en los engranes rectos.

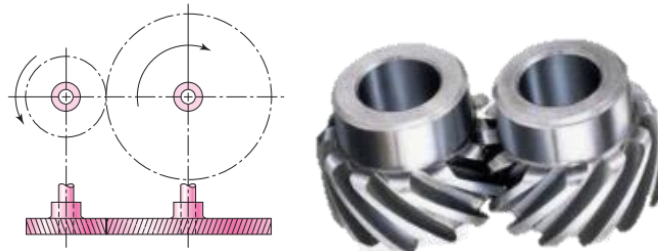


Figura 3. Engrane helicoidal (Fuente: Budynas y Nisbett, 2008).

Los engranes cónicos (Figura 4) que presentan dientes formados en superficies cónicas, se emplean sobre todo para transmitir movimiento entre ejes que se intersecan. En la Figura 3 se exhiben en realidad engranes cónicos de dientes rectos. Los engranes cónicos en espiral se cortan de manera que el diente no sea recto, sino que forme un arco circular.

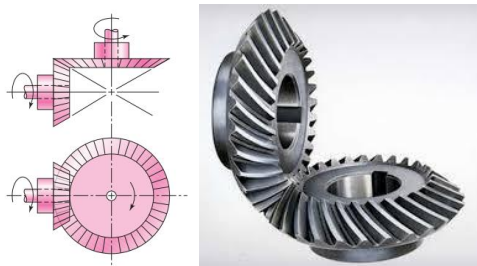


Figura 4. Engranes cónicos (Fuente: Budynas y Nisbett, 2008).

El tornillo sinfín o de gusano (Figura 5) representa el cuarto tipo de engrane básico. Como se indica, el gusano se parece a un tornillo. El sentido de rotación del gusano, también llamado corona de tornillo sinfín, depende del sentido de rotación del tornillo sinfín y de que los dientes de gusano se hayan cortado a la derecha o a la izquierda. Los engranes de tornillo sinfín también se hacen de manera que los dientes de uno o de ambos elementos se envuelvan de manera parcial alrededor del otro (Budynas y Nisbett, 2008).

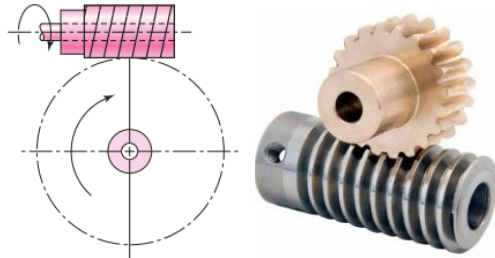


Figura 5. Engrane de tornillo sinfín o gusano (Fuente: Budynas y Nisbett, 2008).

2.1.2 Fallos en engranes

Anteriormente, en la sección de justificación se puede leer un poco de los distintos tipos de fallas en engranes, en esta sección se repite un poco de ello y se explica a mayor profundidad. Las formas en que puede fallar un engrane son muy diversas, pero pueden determinarse con un detenido análisis ya que cada tipo de falla deja una pista característica en los dientes. Se pueden distinguir 5 tipos de fallas: desgaste, fatiga superficial, flujo plástico, rotura de los dientes y fallas combinadas (Benítez, 1985).

Desgaste: El desgaste se puede definir como el deterioro que sufren los dientes y por el cual son removidos de sus superficies capas de metal de manera más o menos uniforme, tal y como se puede observar en la Figura 6 (señalado con flechas rojas). Esta clase de desgaste reduce el espesor del diente y causa muchas veces grandes cambios en el perfil del mismo. Las causas más comunes del desgaste en los dientes de los engranes son, el contacto de metal contra metal por fallas de la película lubricante entre los dientes, la presencia de partículas abrasivas en el aceite, desplazamiento de la película de aceite en el área de contacto ocasionando un desgaste rápido o la formación de estriado y el desgaste de origen químico provocado por la composición del aceite y de sus aditivos.



Figura 6. Engrane con desgaste en sus dientes (Fuente: Espejo y Martínez, 2008).

Fatiga superficial: Esta falla ocurre incluso con lubricación adecuada y una película ininterrumpida de aceite: es el resultado de esfuerzos repetidos en la superficie

del engrane hasta que se forma una grieta en la superficie o cerca de ella. La grieta aumenta progresivamente (véase la Figura 7 señalado con flechas rojas) hasta que se rompe un pequeño pedazo del engrane y deja una picadura en la superficie. Como esto ocurre después de muchos millones de ciclos de esfuerzo, las fallas por fatiga por lo general resultan evidentes solo después de prolongados servicios. Esto contrasta con el desgaste y la escoriación que pueden comenzar en forma rápida.

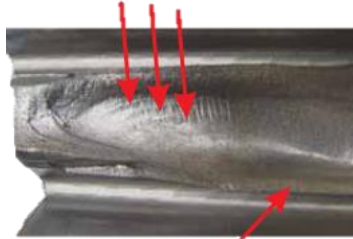


Figura 7. Diente con falla por fatiga superficial (Fuente: Espejo y Martínez, 2008).

Flujo plástico: Aunque el flujo plástico puede tomar varias formas siempre es el resultado de cargar el engrane por encima de la carga de deformación permanente del metal en la zona de contacto. Si las cargas de compresión son elevadas o la vibración causa cargas intermitentes altas que hacen las veces de golpe de martillo, la superficie de los dientes puede laminarse o descamarse. Esta falla se presenta como un flujo severo de material superficial, como se ve en la Figura 8, que resulta en la formación de rebordes de altura irregular en los extremos y/o en las puntas de los dientes. Esta falla está asociada con la plasticidad del material del engrane, aunque frecuentemente ocurre en engranes con capa endurecida fuertemente cargados y engranes endurecidos completamente.

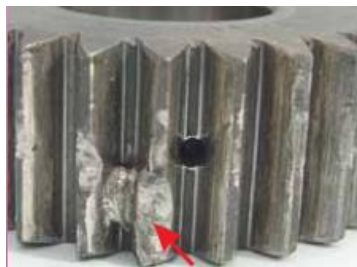


Figura 8. Diente con falla por flujo plástico (Fuente: Espejo y Martínez, 2008).

Fractura de dientes: esta falla resulta de sobrecargas o por ciclos de esfuerzo de los dientes más allá del límite de endurecida del material. Cuando un diente se rompe, como se puede ver en la Figura 9, por la fatiga debe haber evidencia de un punto focal donde comienza la fractura. A veces una raya o una entalla en la raíz pueden coincidir con ese punto focal; una inclusión o una grieta debida al tratamiento térmico se pueden encontrar allí. Cuando un diente se rompe por un choque repentino o una sobrecarga, la fractura suele tener una apariencia fibrosa. La fractura puede ser por fatiga y este se puede reconocer por la presencia de curvas semielípticas con marcas perpendiculares en la superficie de la fractura que irradian desde el foco o núcleo de la fractura. Son el resultado de cargas periódicas suficientemente elevadas para agrandar una grieta, pero no tanto como para que una sola de ellas sea capaz de provocar individualmente la fractura del diente.



Figura 9. Diente con falla por fractura (Fuente: Espejo y Martínez, 2008).

Fallas combinadas: en general las fallas no ocurren separadamente en la forma descrita hasta ahora, sino que existen otros factores que hacen que se presenten dos o más fallas al mismo tiempo o que haya una cadena de fallas que conduzcan a la rotura o inutilización del engranaje.

2.1.3 Aplicaciones

Elegir el tipo de engrane adecuado es fundamental para evitar paros y costosas reparaciones en cualquier ámbito industrial. Existen, cuatro aplicaciones de los engranes especialmente representativas y utilizadas en infinidad de sectores y ámbitos (Redacción Aceromafe, 2022).

Bomba hidráulica: Transforma la energía mecánica rotatoria en energía hidráulica. Se compone de un par de engranes acoplados y cuenta con el eje conducido y con el conductor, que es el accionado por el eje del motor (CLR, 2022), véase la Figura 10.



Figura 10. Bomba hidráulica Rotoplas (Fuente: Rotoplasmx, 2019).

Reductor de velocidad: Emplean pares de engranes circulares y dentados (Figura 11) para rebajar la velocidad del motor de forma eficaz y segura. Además, usan engranes con diámetros muy diferentes, para reducir la velocidad de giro (CLR, 2022).

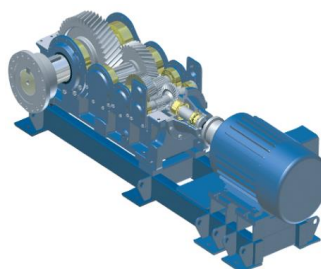


Figura 11. Reductor de velocidad (Energía Controlada de México, 2023).

Diferencial: Muy utilizado en el sector automovilístico, facilita que, en las curvas, las dos ruedas motrices de un vehículo puedan girar a distinta velocidad que las demás, como en la Figura 12. El diferencial está formado por dos engranes planetarios unidos a los extremos de los semiejes de las ruedas, y otros dos satélites o piñones cónicos situados en los extremos de su eje porta satélites (CLR, 2022).



Figura 12. Diferencial (Fuente: Bardahl, 2021).

Caja de velocidades: Acopla el motor con el sistema de transmisión con diferentes relaciones de engranes, como los que se ven en la Figura 13. Además, reduce el número de revoluciones del motor. Unos rodamientos de bolas soportan los ejes del cambio. Se acopla al volante de inercia del motor a través del embrague o del convertidor de par (de Fermín, 2020).

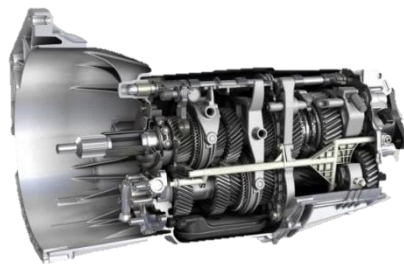


Figura 13. Caja de velocidades manual (Fuente: Plaza, 2020).

Las transmisiones por engranajes destacan por su exactitud en la relación de transmisión, lo que las hace idóneas para maquinaria de precisión y la relación de transmisión en una transmisión por engranajes se puede establecer mediante la Ecuación 1:

$$n_1 * z_1 = n_2 * z_2 \quad (1)$$

donde n es la velocidad angular y z es el número de dientes.

2.2 Transmisiones automotrices

Con esta última aplicación de los engranes en mente, se procede a hablar de las cajas de transmisión en los automóviles. Las cajas de transmisión automotriz son equipos mecánicos desarrollados con el fin de aumentar de salida de un motor, o la velocidad de este mismo. Dentro de la industria existen distintos tipos de transmisiones automotrices,

de las cuales se puede mencionar: la transmisión manual, la transmisión Transmisión variable continua (CVT-Continuously Variable Transmission,) y la transmisión automática (Díaz, 2008). En la presente investigación la transmisión que resulta un tema de interés es la transmisión manual, estando presente en vehículos automotrices con transmisión manual y en vehículos automotrices con mecánicas híbridas ligeras (Fernández, 2020).

2.2.1 Tipos de transmisión automotriz

Transmisión manual: La transmisión manual es el punto de partida para la transmisión moderna que se conoce hoy en día, este tipo de cajas funcionan de manera dependiente del usuario, es decir, se requiere la intervención de este para que se pueda realizar un cambio en las velocidades. En la figura 14 se puede observar un ejemplo de este tipo de transmisión y las partes que la conforman, para posteriormente explicar un poco su funcionamiento.

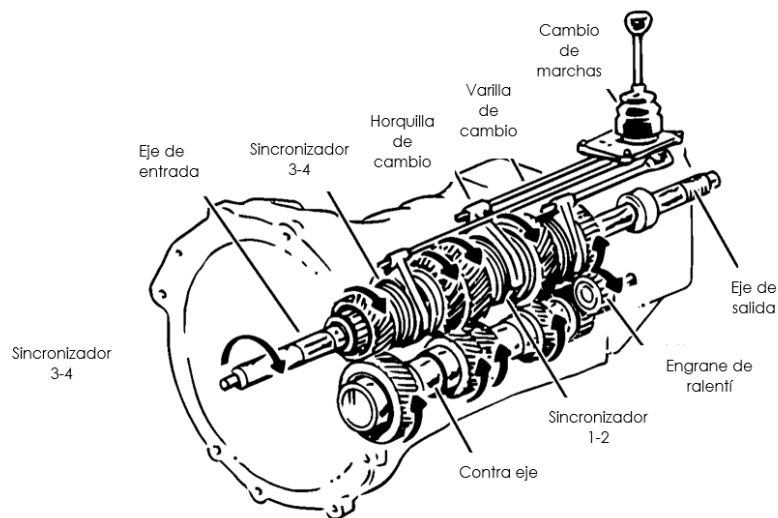


Figura 14. Transmisión manual (Fuente: Rodríguez, 2021).

El principio de funcionamiento se basa en la palanca de cambios, esta es accionada por el conductor y se encuentra conectada a una serie de barras de selector, en la parte superior o lateral de la caja de cambios. Las barras yacen en paralelo con los ejes que llevan los cambios. El motor acciona al eje de entrada, el cual impulsa al eje intermedio. El eje intermedio gira los engranes en el eje principal, aunque éstos giran libremente hasta que se bloquean por medio del dispositivo sincronizador, que está calzado al eje. El dispositivo sincronizador es el que realmente acciona el conductor, a

través de una barra selectora con una horquilla que mueve el sincronizador para engranar la marcha. El anillo sincronizador, un dispositivo de retardo en el sincronizador, es el refinamiento final en la caja de cambios moderna. Evita el acople de un cambio hasta que las velocidades del eje se sincronizan (Díaz, 2008).

Transmisión en manual con mecánicas híbridas ligeras: Por otro lado, la marca de autos Kia demuestra que la transmisión manual puede llegar a ser parte del parque vehicular actual con su modelo Kia Rio y su transmisión Transmisión Manual Inteligente (IMT-Intelligent Manual Transmission), véase en la Figura 15, que funciona con un generador de arranque híbrido ligero para apagar el motor cuando el vehículo va a detenerse por inercia. Esto mejora la eficiencia general de combustible y puede reducir las emisiones de CO₂ en aproximadamente un 3% en condiciones de uso real. La marca engranada permanece activada incluso con el motor apagado. El motor se reactiva tan pronto como el conductor presiona los pedales del freno o del acelerador (Fernández, 2020). Esto prueba que la transmisión manual a pesar de que su producción ha ido disminuyendo con el paso de los años, aún queda una oportunidad para nuevas implementaciones y mejoras.

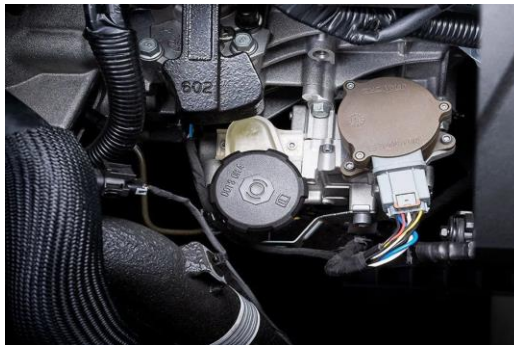


Figura 15. Caja de cambios manual KIA para coches híbridos ligeros (Fuente: Fernández, 2020).

2.2.2 Fallos en caja de transmisión

Ahora que ya se explicó un poco del funcionamiento de la caja de velocidades se puede pasar a otro tema: las fallas en la caja de transmisión. Existen diversos factores que pueden provocar estas fallas, ambientales, por el tipo de terreno, mantenimiento, etc.; pero ahora la descripción se centra aquellas que dependen del tratamiento interno que se le dé al vehículo, para esta sección es complicado presentar imágenes donde

aparezca el fallo, ya que se presentan cuando la caja de velocidades está en funcionamiento.

Vibraciones al acelerar o al ralentí: En este caso, las vibraciones serían especialmente perceptibles al acelerar con una carga baja o media de acelerador. Es conveniente notar en el cuentavueeltas, y ver si la aguja oscila. Estas "vacilaciones" también pueden venir ocasionadas por elementos del motor como inyectores en mal estado, por lo que es importante aislar los síntomas del resto de posibles averías. En el caso del cambio, esto indicaría un problema en el tambor donde se alojan los discos de embrague o en el propio eje de entrada de la transmisión. Estas vibraciones o tirones pueden ir asociados a una dificultad para cambiar de marcha.

Holgura de los engranajes: Esta falla de la transmisión manual ocasiona un ruido excesivo, imposible de ignorar. No es extraño que aquellos autos que tienen un kilometraje muy elevado sufran del desgaste de los engranajes, lo que derivará en ruidos muy molestos. La solución no es sencilla, ya que consiste en el desmontaje de la caja de cambios y su apertura.

Sincronizadores dañados: En caso de que los sincronizadores se encuentren dañados, es probable que una marcha se desengrane de manera repentina. De la misma forma, no es una falla común y suele presentarse con mayor frecuencia en los coches que cargan con muchos kilómetros, en la Figura 16 se muestra algunos sincronizadores dañados por corrosión.



Figura 16. Sincronizadores con corrosión (Fuente: Foro coches, 2014).

No se mueve, ni adelante ni atrás: Si el coche no responde a los inputs y es incapaz de moverse en ninguna dirección, lo más plausible es que exista un fallo en la bomba de aceite de la propia caja de cambios. Al no tener presión de aceite, el convertidor de par no puede transmitir la fuerza del motor a los embragues de la caja de cambios, y no se puede mover. También puede estar causada por un fallo catastrófico de la caja de cambios, pero los síntomas previos a ese fallo son perceptibles durante miles de kilómetros - no sería un fallo repentino y súbito (Álvarez, 2020).

2.3 Análisis de vibraciones

Teniendo en cuenta que el objetivo de muchas industrias es dar mantenimiento a sus equipos para evitar pérdidas en la producción y reparaciones. Los análisis vibro acústicos son elementos con alto valor de diagnóstico, especialmente recomendados cuando se trata de monitorear equipos sumamente costosos, sometidos a operación continua, cuya parada o salida de servicio comporta costos de penalización sumamente elevados, y ello justifica que se recurra a las técnicas más sofisticadas para prevenir el riesgo de pérdidas económicas y tecnológicas (Mosquera, 2001).

Dos aspectos principales logran el mantenimiento predictivo por vibraciones mecánicas sobre otros métodos generales de mantenimiento, la reducción de costos y, el aumento de la seguridad sobre el funcionamiento de los equipos. Esto consiste en la configuración de una metodología que permita la vigilancia continua de las máquinas, especialmente aquellas que son las principales y las de importancia relativa en el proceso productivo de la empresa industrial (Gavilán, 2007).

Para que esta nueva metodología, basada en la vigilancia continua, sea eficaz frente a los conceptos tradicionales de mantenimiento, debe abarcar los objetivos siguientes:

1. No impedir o limitar el funcionamiento de la máquina durante su ejecución;
2. Su costo de implantación debe ser menor que el ocasionado por otro tipo de mantenimiento;

3. Debe permitir la detección de la avería en fase incipiente antes de convertirse en catastrófica, así como la identificación o diagnóstico de la causa que la origina.

Las máquinas ideales no vibran. Toda la energía que intercambia es empleada para efectuar el trabajo para el cual fue diseñada. Una buena concepción de fallas es el nivel de vibración. Son muchos los factores de operación, diseño y montaje que provocan el surgimiento de los diferentes niveles de vibración.

El hecho de que la condición de la máquina esté íntimamente ligada con las vibraciones que ella produce hace que la medición, el análisis de vibraciones, el análisis de señales y el análisis mecánico sean las herramientas básicas del mantenimiento predictivo por vibraciones mecánicas (Gavilán, 2007). Como anteriormente ya se mencionaba, el análisis de señales por medio de la Transformada de Fourier resulta una herramienta muy útil.

2.3.1 Cálculo de voltaje de valor cuadrático medio Valor Cuadrático Medio (RMS-Root Mean Square).

En los circuitos electrónicos, la señal está asociada con una CA (corriente alterna) y CC (corriente continua). La onda sinusoidal o sinusoidal representa la señal de CA periódica que varía con el tiempo y fluctúa entre ciclos positivos y negativos. Mientras que la señal / forma de onda de CC representa la magnitud de los valores de voltaje y corriente de manera fácil y estable. Pero la magnitud de los valores de corriente y voltaje de la señal de CA debe calcularse usando sus valores instantáneos, un valor pico de la señal, valor pico a pico, valor promedio y voltaje RMS (FMUSER, 2021).

El análisis de vibración tiene distintas medidas generales que ayudan para detectar fallas con los distintos voltajes en la forma onda, es decir: para el desplazamiento se usa el voltaje Pico a Pico (V_{pp}), para la velocidad el voltaje pico (V_p), para la aceleración el voltaje pico real (V_{TP}), y para las aceleraciones de alta frecuencia el voltaje RMS (V_{RMS}), se pueden identificar estos parámetros en la gráfica de la Figura 17.

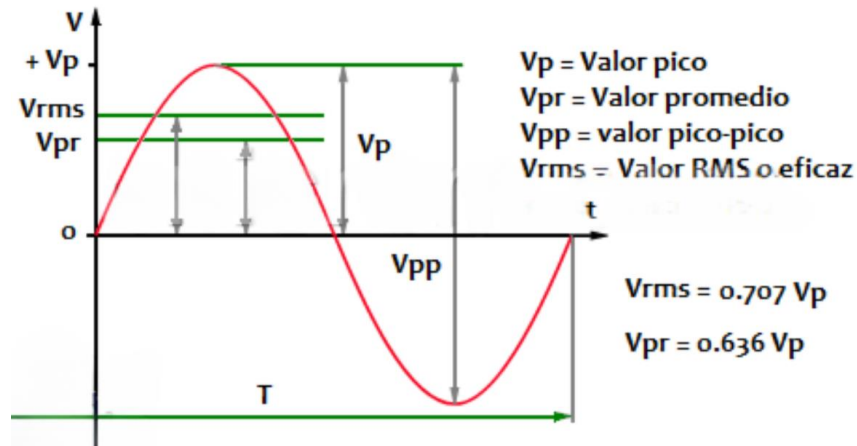


Figura 17. Identificación de valores de voltaje en onda senoidal (Fuente: Electrónica Unicrom, 2015).

Estos se denominan medidas generales, ya que proporcionan un único valor de medida general en lugar de un espectro. Las mediciones generales se pueden utilizar para identificar una falla en desarrollo en una pieza del equipo. Las mediciones generales pueden generar tendencias a lo largo del tiempo para distinguir la tendencia en el estado de la máquina. Las mediciones generales tienen su propia limitación y no es posible identificar la falla específica, ya que requiere identificar valores a una frecuencia específica. La aceleración Pico verdadero o aceleraciones de alta frecuencia RMS se utiliza para analizar los defectos relacionados con la fuerza que ocurren en la banda de alta frecuencia. Además, la aceleración es una buena medida de la vibración de alta frecuencia que se puede utilizar para analizar frecuencias de más de 1 KHz (60 000 RPM) y para identificar problemas de rodamientos, cavitación y lubricación. El valor RMS se define como la raíz cuadrada de las medias de los cuadrados de los valores instantáneos.

También, el valor RMS es la medida de amplitud más relevante porque tiene en cuenta el historial temporal de la onda y proporciona un valor de amplitud que está directamente relacionado con el contenido de energía y, por lo tanto, con las capacidades destructivas de la vibración (sensegrow, 2023). En el caso de esta investigación se utiliza el valor rms ya que las muestras recolectadas con el sensor, son aceleraciones de alta frecuencia. Las aceleraciones o energía de alta frecuencia: es la aceleración RMS o el pico en la banda de alta frecuencia filtrada (generalmente, banda de 5 kHz a 50 kHz). La fórmula que se utiliza para calcular el V_{RMS} , es la ecuación (2):

$$V_{RMS} = \frac{V_p}{\sqrt{2}} \approx 0.707 * V_p \quad (2)$$

donde el V_p es el valor máximo alcanzado durante un ciclo de forma de onda de vibración.

Por último, respecto al tema del valor RMS, la experiencia ha demostrado que el valor RMS general de la velocidad de vibración medido en el rango de 10 a 1000 Hz brinda la mejor indicación de la gravedad de una vibración en máquinas rotativas. Una explicación probable es que un nivel de velocidad dado corresponde a un nivel de energía dado; la vibración a bajas y altas frecuencias se ponderan por igual desde el punto de vista de la energía de vibración (Brüel & Kjær, 2023).

2.3.2 Transformada de Fourier

Cuando se hace un análisis de vibraciones una de las herramientas más poderosas y mayormente usada es la Transformada de Fourier. La idea que subyace en las series de Fourier es la descomposición de una función periódica en términos de funciones periódicas básicas (senos y cosenos) cuyas frecuencias son múltiplos de la función original. La descomposición de una función o señal permite el análisis de sus propiedades y la síntesis de los objetos o fenómenos (Gómez, 2020).

Para probar esto en términos matemáticos se tiene que $f(t)$, es una función periódica con periodo T , la cual se puede representar por la serie trigonométrica de la ecuación 3:

$$\begin{aligned} f(t) &= \frac{a_0}{2} + a_1 \cos(w_0 t) + a_2 \cos(w_0 t) + \dots + b_1 \sin(w_0 t) + b_2 \sin(w_0 t) + \dots, \\ &= \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(nw_0 t) + b_n \sin(nw_0 t)] \end{aligned} \quad (3)$$

donde $w_0 = \frac{2\pi}{T}$ es la frecuencia angular fundamental, y a_0, a_n y b_n son los coeficientes de Fourier. La Ecuación (3) representa a una función periódica arbitraria como la suma de componentes sinusoidales que tienen diferentes frecuencias. La componente sinusoidal de frecuencia $w_n = nw_0$ se denomina la n -ésima armónica de la función periódica (Hwei, 1987).

La transformada discreta de Fourier

La transformada de Fourier discreta (DFT- Discrete Fourier Transform) trata con señales discretas compuestas de N puntos separados por un intervalo T (véase la Figura 18). Consecuentemente, DFT trata con un número finito de frecuencias (ecuación 4):

$$w_u = \frac{2\pi}{NT}u, \quad u = 0, 1, \dots, N - 1 \quad (4)$$

Donde:

- u es la variable de frecuencia
- 2π corresponde al periodo de la señal

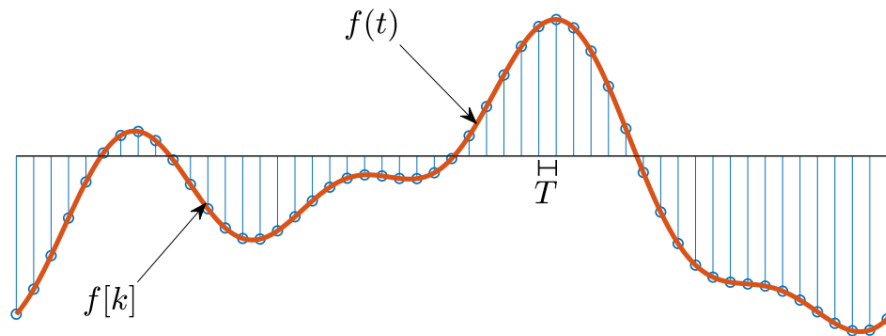


Figura 18. Señal discreta (Fuente: Gómez, 2020).

La transformada de Fourier puede ser evaluada sobre un intervalo finito de tiempo en vez de $-\infty$ a ∞ , es decir, para funciones periódicas. De manera similar, debido a que solo existe un número finito de puntos, la DFT asume periodicidad de la señal (Gómez, 2020), observe la Figura 19.

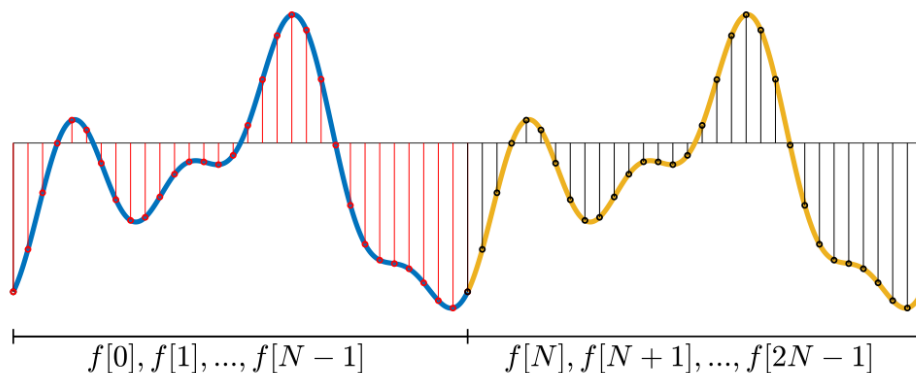


Figura 19. Señal discreta con un intervalo finito (Fuente: Gómez, 2020).

Definición de DFT

- La DFT se define en su forma más elemental cuando $T = 1$.

- De este modo, el par de transformadas de Fourier discretas son mostradas en la ecuación (5) y (6):

$$F(u) = \sum_{k=0}^{N-1} f(k)e^{-\frac{j2\pi uk}{N}}, \text{ para } u = 0, 1, \dots, N - 1 \quad (5)$$

$$f(k) = \frac{1}{N} \sum_{u=0}^{N-1} F(u)e^{j2\pi uk}, \text{ para } k = 0, 1, \dots, N - 1 \quad (6)$$

Donde: $e^{-\frac{j2\pi uk}{N}}$ es la respuesta a las exponenciales imaginarias.

Estas ecuaciones (5) y (6) conforman la DFT que ayuda a transformar a una función del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia, pero sin alterar su contenido de información. La idea básica, radica en que es posible formar cualquier función como una suma de una serie de términos seno y coseno de frecuencia creciente. En otras palabras, cualquier espacio o tiempo que varía datos puede ser transformado en un dominio diferente llamado el espacio de frecuencia (Mohammed, 2012).

Las variaciones de velocidad y carga también contribuyen a las vibraciones en sistemas con engranajes, cuando los dientes del engranaje entran en contacto produciendo una frecuencia de impacto llamada frecuencia de engranaje (f_m) esta es la principal frecuencia a la que los engranajes inducen vibraciones y está dada por la ecuación (7)

$$f_m = N \cdot f_r \quad (7)$$

donde N es el número de dientes y f_r es la frecuencia de rotación del eje de entrada o salida a analizar (Saucedo et al., 2016).

Para cajas de engranajes en buenas condiciones, los espectros de vibración comúnmente muestran las frecuencias del eje de entrada y salida, así como la frecuencia de malla con frecuencias de banda lateral ($f_{bandalateral}$) alrededor de la frecuencia de malla y sus armónicos correspondientes, ecuación 8. En la Figura 20 se muestra un espectro de vibración teórico para una caja de engranajes en buen estado y en la Figura 21 con un desgaste uniforme:

$$f_{bandalateral} = f_m \pm f_r \quad (8)$$

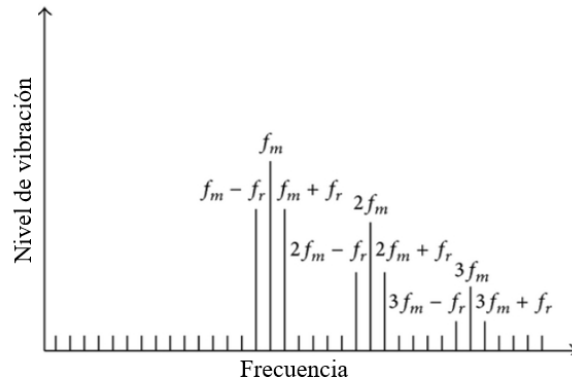


Figura 20. Espectro de vibración típico de una caja de engranajes en condición saludable (Saucedo et al., 2016).

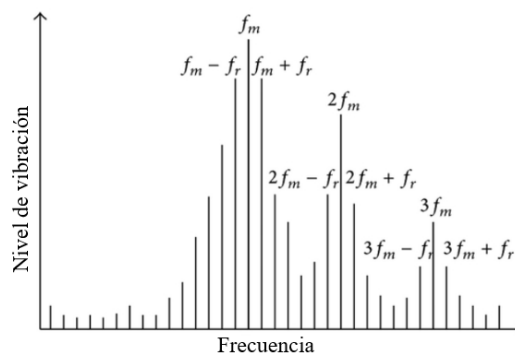


Figura 21. Espectro de vibración típico de una caja de engranajes con desgaste uniforme (Saucedo et al., 2016).

La DFT también se utiliza para:

- Analizar contenido de frecuencia de las señales.
- Determinar cómo cambia la amplitud y las fases de las señales sinusoidales cuando estas pasan a través de un sistema lineal e invariante en el tiempo.
- Generar formas de onda de corriente o tensión eléctrica por medio de la superposición de senoides generados por osciladores electrónicos de amplitud variable IMT cuyas frecuencias ya están determinadas.
- Analizar el comportamiento armónico de una señal (Mohammed, 2012).

Algunos ejemplos concretos de aplicación, son los siguientes: En el campo electromagnético y de microondas la DFT está relacionada con: el cálculo del campo cercano transitorio irradiado por dispositivos electrónicos, el análisis de fenómenos de inspiración óptica novedosos en microondas, el cálculo del campo electromagnético de rayos, la formación de haz y la radiación de microondas solares. En medicina el análisis de la transformada de Fourier está relacionado con: el análisis espectral del

comportamiento global de los cromosomas, el análisis espectral de la variabilidad de la frecuencia cardiaca, el procesamiento de imágenes generadas por escanogramas, resonancias magnéticas y tomografía axial. En comunicaciones se usa para analizar la frecuencia de señales, diseñar los sistemas de transmisión de señales para transmitir información, diseñar supresores y canceladores de ecos en líneas telefónicas.

En ingeniería mecánica se utiliza para balancear rotores y eliminar la vibración que generan cuando o están balanceados, estudiar los problemas relacionados con vibraciones mecánicas en los motores, generadores y equipos rotatorios en general. En procesamiento de señales de audio se usa para compactar las señales de audio. Producir efectos de sonido, diseñar sintetizadores de audio y ecualizadores. Finalmente, en procesamiento de imágenes la DFT se utiliza para filtrar imágenes, extraer características de interés, realizar transformaciones de imágenes y compactar imágenes (Mohammed, 2012).

Capítulo III

3 Metodología

En este capítulo se presenta la metodología que se desarrolló para realizar el análisis de fractura en dientes de engranes de transmisiones automotrices mediante vibraciones, en la en la Figura 22 se muestra el diagrama a bloques que describe la metodología propuesta, para su implementación debe seguirse el sentido y flujo determinado por las flechas y la numeración asignada. El desarrollo general de la metodología incluyó, como primer paso la elección del engrane que se realizó abriendo la caja de transmisión bajo estudio (transmisión manual Nissan D21) y revisando si alguno de sus engranes presentaba el fallo a estudiar en este trabajo; en el paso dos, después de haber elegido un engrane, se le induce el fallo manualmente con herramienta de percusión, como tercer paso esta la creación de un banco experimental, que nace de la necesidad de poder inducir (reproducir) diferentes condiciones de operación en dicha transmisión (diferentes velocidades de giro) para así poder adquirir una base de datos; el cuarto paso hace referencia a la instrumentación y se refiere a las adaptaciones físicas que se harán en la transmisión automática para que la instalación de acelerómetros sea de manera ordenada y segura. La adquisición de señales del paso 5 se llevará a cabo mediante el monitor de vibraciones SCXI-1530 de NI que ofrece muestreo simultáneo para conservar relaciones de fase entre canales; después en el paso 6, se realizaron diferentes experimentos siguiendo una matriz de pruebas en donde se especificó la adquisición de datos de pruebas en estado óptimo y con el engrane dañado para poder comparar los casos. Después, mediante el uso del software MATLAB® (versión estudiante) se hace el procesamiento de señales en el paso 7. Parte del procesamiento de señales se basa en la transformada rápida de Fourier (FFT) para pasar las señales al dominio de la frecuencia y analizar las componentes frecuenciales de falla, además, se complementa con un procesamiento en el dominio del tiempo mediante el cálculo del valor rms de las vibraciones y ahí identificar posibles cambios de información que no es evidente en la señal completa tomada en el dominio del tiempo. Con el paso anterior se procede al último paso, el análisis de las señales, para finalmente determinar si, existen cambios significativos en la transmisión estándar cuando los engranes se encuentran dañados por fractura o si en realidad el funcionamiento no se ve afectado.

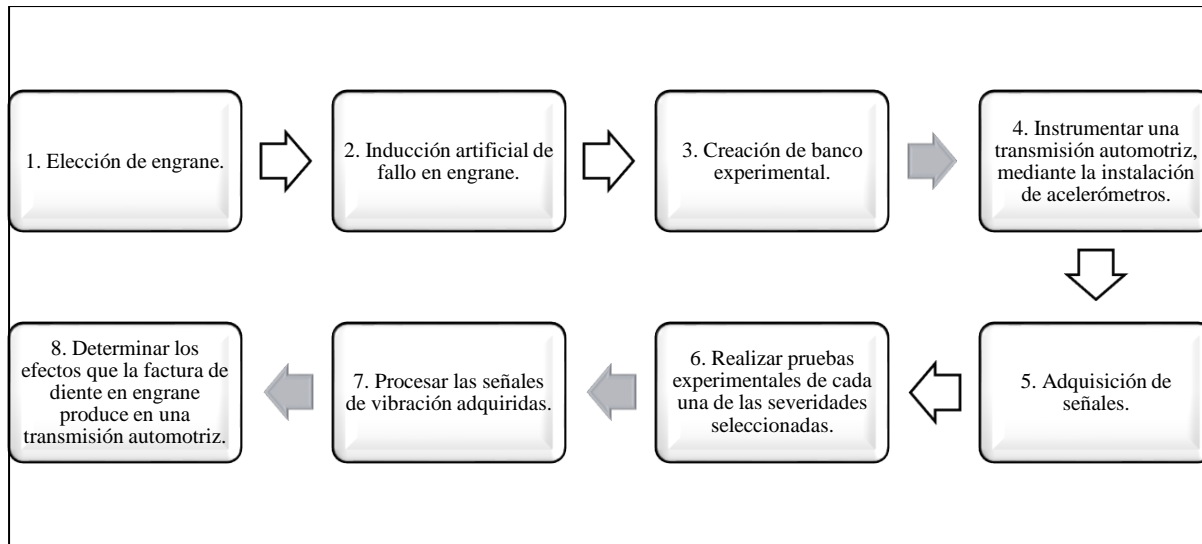


Figura 22. Diagrama de bloques de la metodología.

A continuación, se describe detalladamente cada uno de los pasos que se siguieron durante el desarrollo de esta tesis, todo el proceso de la metodología se realizó en las instalaciones de la Facultad de Ingeniería de la UAQ Campus San Juan del Rio.

3.1 Elección de engrane

Se parte de que la transmisión donde se buscó el engrane se encuentra en buen estado y que es una caja de velocidades manual (estándar), es importante mencionarlo ya que se piensa hacer el análisis posterior en esta misma transmisión; en este sentido, se hace una inspección de la caja, desarmándola con ayuda de herramienta del taller mecánico automotriz de la UAQ, como lo es la pistola de calor, una pistola de impacto mecánico (para aflojar/apretar tuercas o tornillos que requieren de un mayor torque del que se puede dar con el dado y la matraca), dados, matraca, unas alicates para retirar anillos de sellado, desarmador plano, martillo, un trapo para limpiar los componentes ya que estos se encuentran sumergidos en aceite y un cartón para que al abrir la transmisión se ponga sobre este para escurrir una parte del aceite.

El proceso a realizar para el desarmado se describe a continuación, la Figura 23 servirá como apoyo visual para mejor comprensión. Lo primero que se hace es separar la carcasa que protege los engranes dentro de la transmisión (círculo 3), de las dos partes de carcasa (círculo 1 y 2), que se encarga de unir las. Posterior a ello se saca la palanca de cambios, que se encuentra unido a la pieza donde señala el círculo 4 de la transmisión,

para así permitir deslizar sobre la caja de engranajes la parte 2 de la carcasa de la transmisión y tener a la vista los engranes.

Al tener la caja de engranajes a la vista, como se observa en la Figura 24, se hizo una inspección para detectar la falla de diente fracturado (véase en figura 8 como recordatorio) en alguno de los engranes, esta falla de manera casi insignificante se encontró en un engrane de 23 dientes (véase en la Figura 25) que está relacionado con la quinta velocidad y la reversa, aun así, se eligió este engrane para ser sometido al experimento, con la primicia de que entonces se tendría que inducir un mayor daño para así notar mayores cambios en el análisis de las señales.

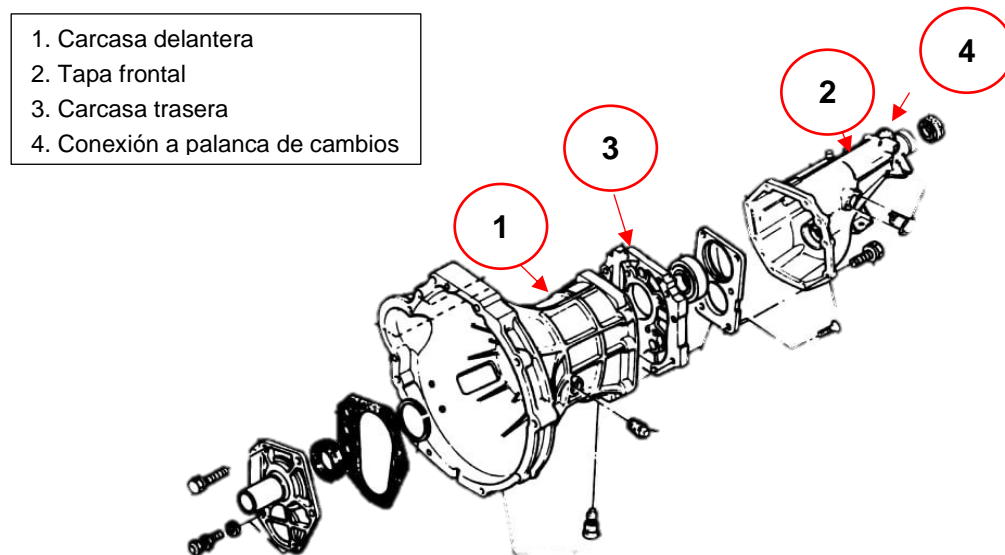


Figura 23. Imagen de apoyo para entender el proceso de desarmado (Fuente: Nissan D21 Manual Transmission Rebuild Kit,2023).



Figura 24. Transmisión Nissan D21 abierta.

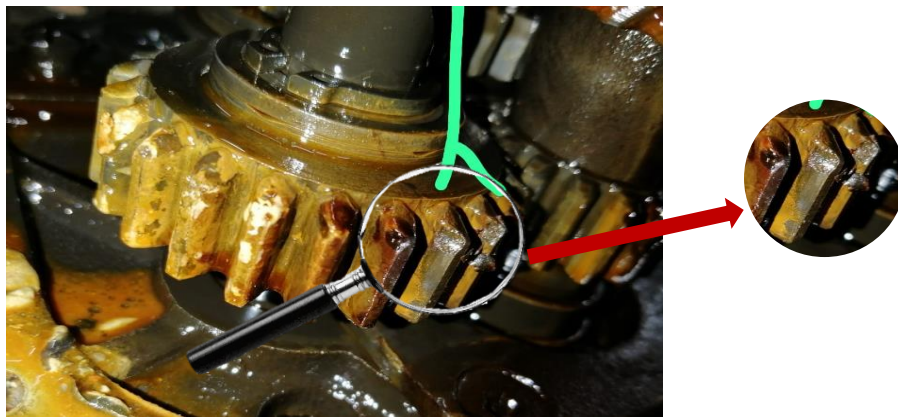


Figura 25. Diente de engrane con pequeño fallo por fractura.

Como se mencionó anteriormente este engrane seleccionado interfiere en la quinta velocidad y en la reversa, para poder visualizar mejor esto se presenta la figura 26 (a) y 26 (b), donde se encuentra de una manera más notoria el engrane de este estudio, en el primer inciso vemos el engrane influyendo en la reversa y en el segundo inciso en la quinta velocidad de la transmisión.

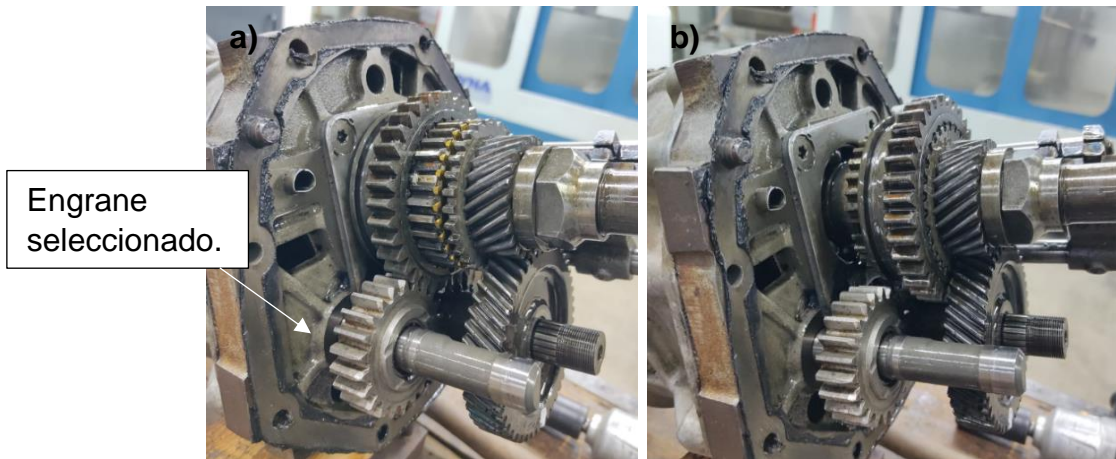


Figura 261. Transmisión automotriz manual en la reversa (a) y 5ta velocidad (b).

La velocidad donde se realizó el análisis es en la quinta marcha, donde solo tiene contacto con un engrane de 15 dientes. Este dato se utilizará posteriormente para el cálculo de las frecuencias del engrane en la sección de procesamiento de datos ya que la velocidad que se considera el engrane es la que tiene ese engrane de 15 dientes. Al elegir el engrane se prosiguió a sacarlo del eje de salida, esto con ayuda de la pistola de impacto, dados, y matraca para retirar las tuercas y tornillos, también se utilizó los alicates para retirar con mayor facilidad los anillos de sellado, en esta operación se debe tener cuidado del orden en el que van los componentes.

También como ya se mencionaba se consideró como parte del experimento un engrane en condiciones sanas, y se compró un segundo engrane para inducir la falla en un mayor grado de severidad, pero al conectarlo a la caja se notó una falla por excentricidad por lo que se optó por utilizar este último engrane tal y como estaba y hacer el experimento también para la falla por excentricidad, estos son los engranes que se muestran a continuación en la Figura 27.

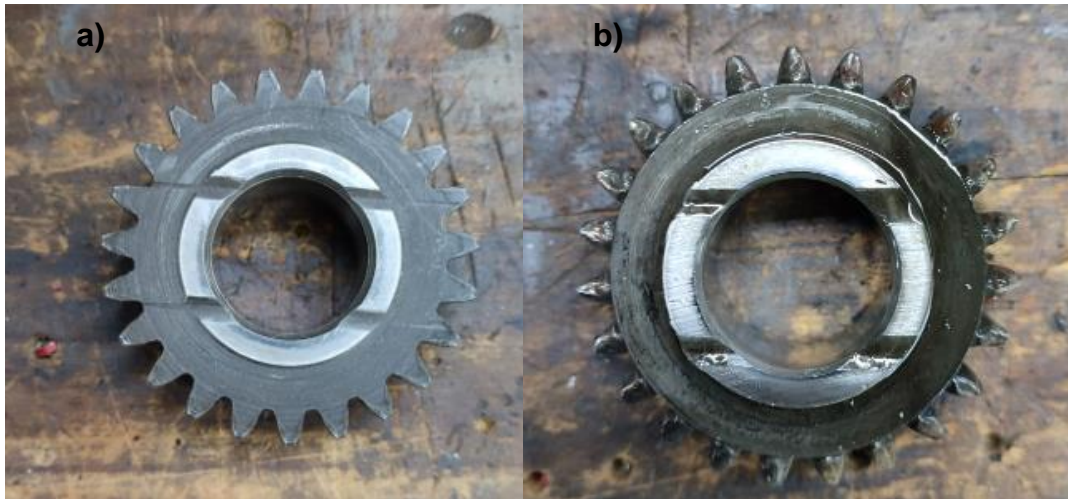


Figura 27. (a) Engrane en estado sano, (b) engrane con excentricidad.

3.2 Inducción artificial del fallo

La inducción de falla tanto como el resto del experimento se realizó en el taller de electromecánica. Primero se colocó el engrane dentro de las paredes de un tornillo de banco, para proseguir a inducir el fallo, esto se hizo con herramientas de percusión (martillo, punto de golpe). Se golpeó un diente de engrane para fracturarlo de tal manera que aproximadamente se rompiera la mitad de la cara (geoméricamente), como se puede ver en la Figura 28. Además de este engrane, se utilizó un engrane sano que se compró del mismo modelo que el engrane al que se le indujo el daño, para así poder comparar las señales de ambos estados del engrane.

Se eligió hacer el daño con herramientas de percusión ya que estas generaban una fractura más similar a la que se podría generar dentro de la caja de velocidades, partiendo de que la fractura en un diente de engrane es causada por choques repentinos o sobrecarga que pasa el límite de resistencia del material y, herramienta como la fresadora hubiera hecho un corte muy preciso.

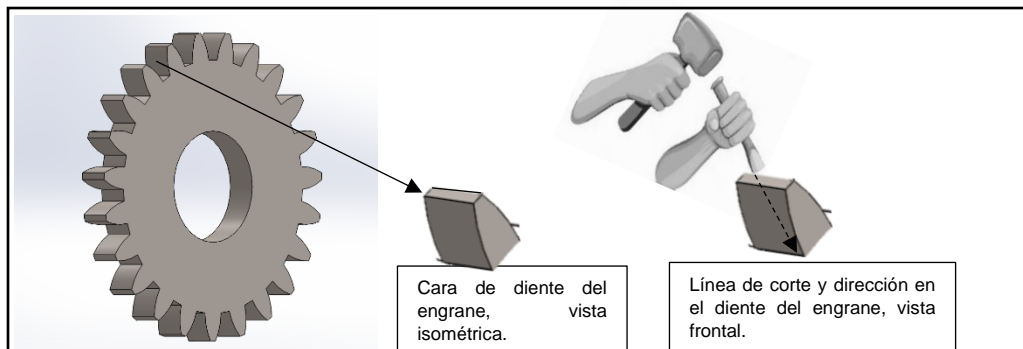


Figura 28. Planteamiento de la fractura artificial del diente del engrane.

Tal y como en la Figura 28 se puede ver, el daño al diente de engrane se con un martillo y un cincel con la dirección que indica la flecha en el diente, hasta que se fracturó la parte del diente, esa imagen se muestra en la sección de resultados.

3.3 Creación del banco experimental

Se generó un banco de pruebas experimentales para realizar diferentes pruebas y poder estudiar los efectos que producen la fractura de dientes de engrane en transmisiones manuales automotrices, dicho banco se creó con la finalidad de hacer la adquisición de datos de forma precisa buscando tener aislada e instrumentada la transmisión en un ambiente controlado. Por otra parte, debe mencionarse que realizar la adquisición de señales de vibraciones sobre la transmisión de cambios en un vehículo hubiesen existido perturbaciones en la señal provocada por los “juegos” entre piezas de la transmisión y del mismo vehículo, entonces para ello se hicieron las adecuaciones necesarias empleando los elementos que se muestran en la Figura 29.

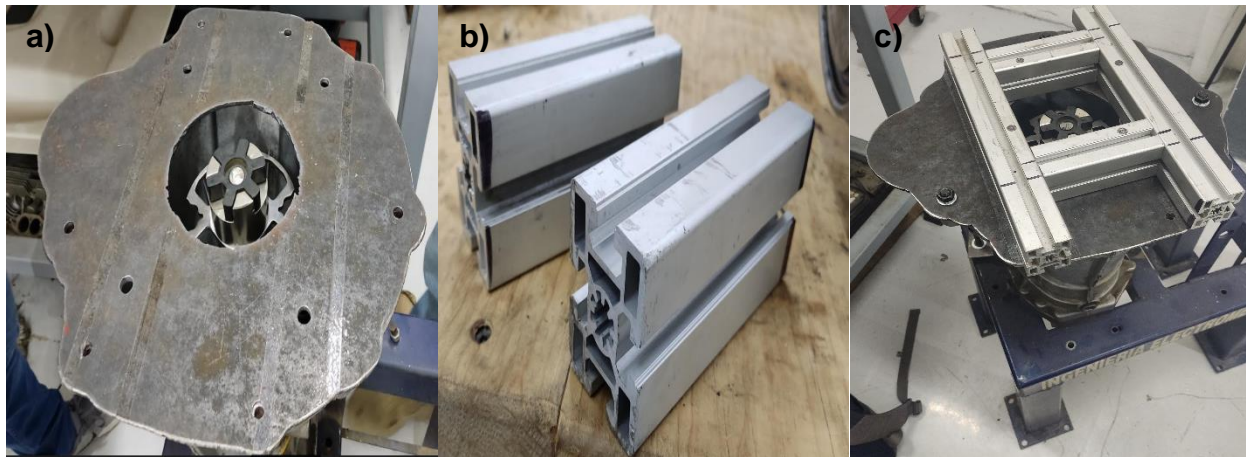


Figura 29. Banco experimental (a) Base para montar el motor, (b) corte en perfiles Bosch.

(c) A continuación, se detalla el proceso de creación del banco experimental, en la Figura 29.a muestra una placa de sujeción que se le realizó cortando una placa de acero calibre 3/8 con la cortadora de plasma, con medidas de la placa se tomaron en base a la carcasa, además se le agregaron orificios en el mismo lugar con los que ya contaba la propia transmisión para un buen ajuste. Esta misma placa de sujeción funge como base para montar los perfiles Bosch (Figura 29.b); estos fueron cortados con un disco de corte de tal forma que formaran una base para el motor en el que este se pudiera

montar sin crear un “juego” entre las piezas, se llama “juego” al posible movimiento entre las piezas generado por la distancia entre los componentes. Ya en la Figura 29.c se aprecia el arreglo preparado para adaptar el motor a la transmisión y así generar un movimiento similar al de un automóvil en movimiento.

Después de terminar de presentar los perfiles Bosch en la base que se cortó, se ajustó con tornillos para fijar, y se colocó un acople del eje de entrada de la transmisión al eje de salida del motor, ese acople se puede observar en la Figura 29.c y se ve la culminación de este banco experimental en la siguiente sección.

3.4 Instrumentar una transmisión automotriz, mediante la instalación de acelerómetros

El resultado final de la instrumentación de la transmisión automotriz se muestra en la Figura 30. En esa imagen se puede ver una palanca de cambios, acelerómetros, motor, y un variador de frecuencia. Cada una de estas partes señaladas tuvo su función durante el experimento. La palanca de cambios sirvió para ajustar la selección de velocidad de la transmisión a la 5ta velocidad, que es donde se encuentra el engrane estudiado, cada que se hizo el cambio del engrane en los distintos casos de falla. Los acelerómetros se pusieron en esa posición para realizar la adquisición de señales un plano perpendicular al eje donde se genera el movimiento rotatorio (véase la figura 31).

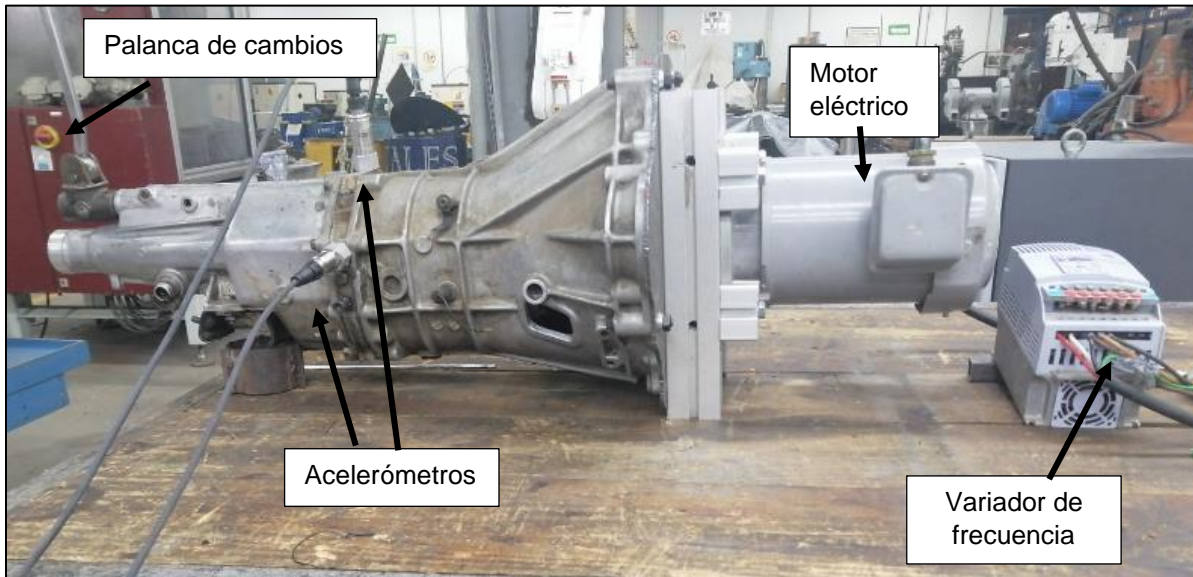


Figura 30. Transmisión automotriz instrumentada .

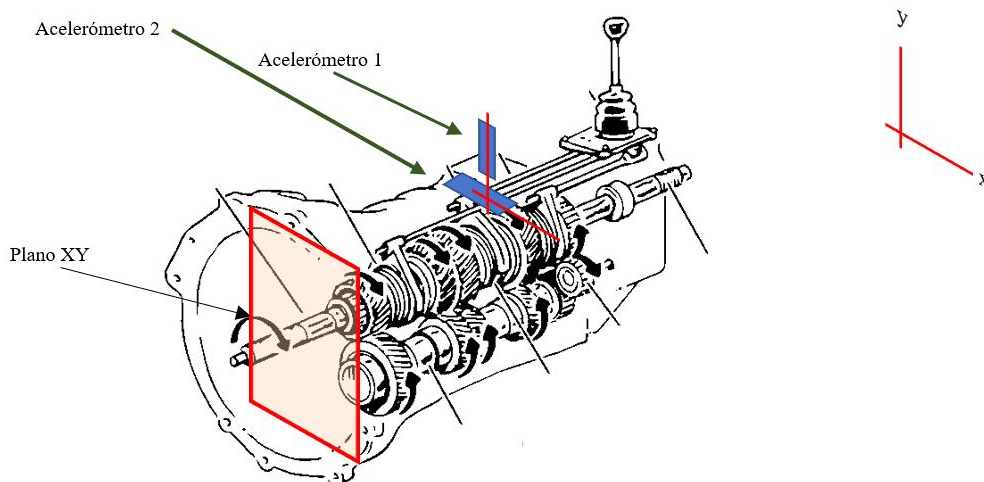


Figura 31. Colocación de los acelerómetros y plano que se estableció (Fuente: Rodríguez, 2021).

El motor eléctrico sirve para inducir en transmisión automotriz un movimiento giratorio similar que produce un motor de combustión interna, este motor eléctrico produce un máximo de revoluciones igual a 1750 rpm (revoluciones por minuto) cuando es alimentado a 60Hz. Las características de este motor son de gran utilidad, ya que, de acuerdo a información oficial de Nissan, la velocidad óptima para hacer el cambio a la 5ta velocidad debe estar por arriba de los 1500rpm (Financial Services Nissan, 2023). Y, por último, el variador de frecuencia sirve para alimentar el motor eléctrico con diferentes frecuencias de operación y generar en su flecha de salida diferentes velocidades de giro, y de esta forma, realizar la adquisición de las señales de vibración de los distintos casos del engrane según la frecuencia en la que estén trabajando, esto cambiando la velocidad de funcionamiento de la transmisión.

3.5 Adquisición de señales

Para la adquisición de señales de vibración se hizo uso de un equipo de laboratorio el cual está conformado por un módulo de adquisición de señales de National Instruments y por una computadora de escritorio, un teclado con su ratón, un monitor de computadora. Específicamente, el módulo de NI ® es el modelo SCXI-1530, en el CPU (Central Processing Unit, Unidad Central de Procesamiento) se tiene instalado el software correspondiente de *National Instrument, LabVIEW*, que permiten la lectura de los sensores de vibración que están conectados al módulo SCXI-15030 por medio los cables

de comunicación de los acelerómetros, en la Figura 32 se muestra el sistema general de adquisición de datos.

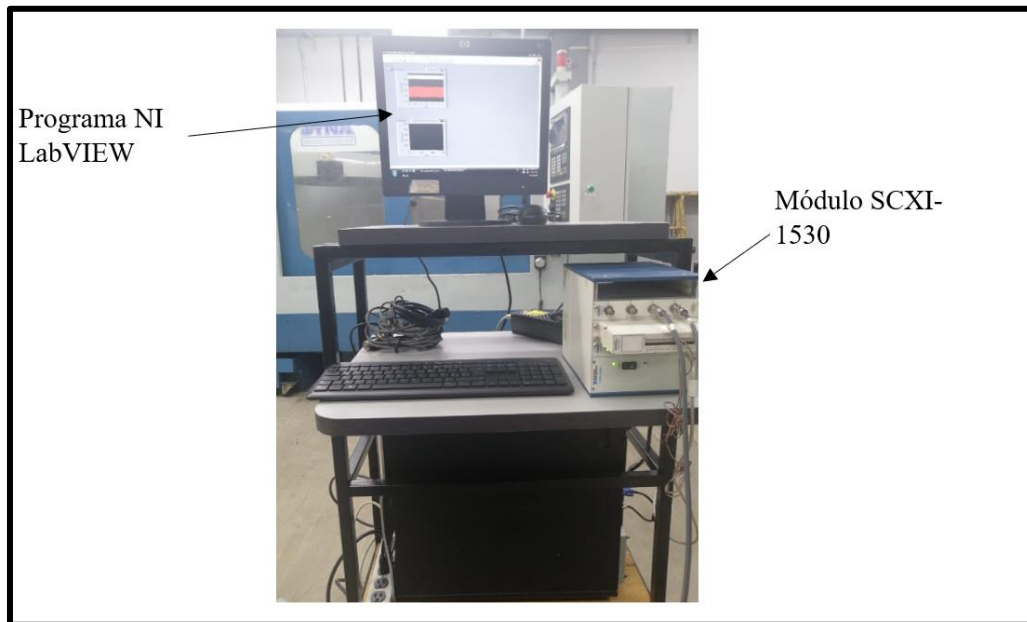


Figura 32. Centro de adquisición de datos.

La conexión fue de la siguiente manera, tal y como se ve en la Figura 32, están los acelerómetros conectados en la transmisión en lo que llamamos el eje x y el eje y, de estos acelerómetros sale un cable de comunicación que van conectados al módulo SCXI como se puede visualizar en la Figura 29. Este módulo SCXI recibe un voltaje proporcional a la aceleración en cada uno de los ejes a los que están conectando en la transmisión, este voltaje fluctúa entre tierra y el valor de alimentación V_{cc} . En cuanto llegan los datos al monitor son procesados por el software LabVIEW, igual que el monitor de NI, con la programación de bloques que se ve en la Figura 33.

1. DAQ Assistant: en este bloque se elige las características del sensor, se especifica que es un acelerómetro y se activa y nombra el número de puertos utilizados, en este caso son dos puertos y los acelerómetros son el acelerómetro modelo 793L y el modelo 622B01.
2. Tiempo: muestra las señales de vibración en el dominio del tiempo.
3. Spectral Measurements: Aplica la FT para cambiar del espectro del tiempo al de la frecuencia.
4. Frecuencia: muestra la gráfica en el dominio de la frecuencia.

5. Write to measurement file: Escribe en un archivo de texto los datos de las muestras tomadas.

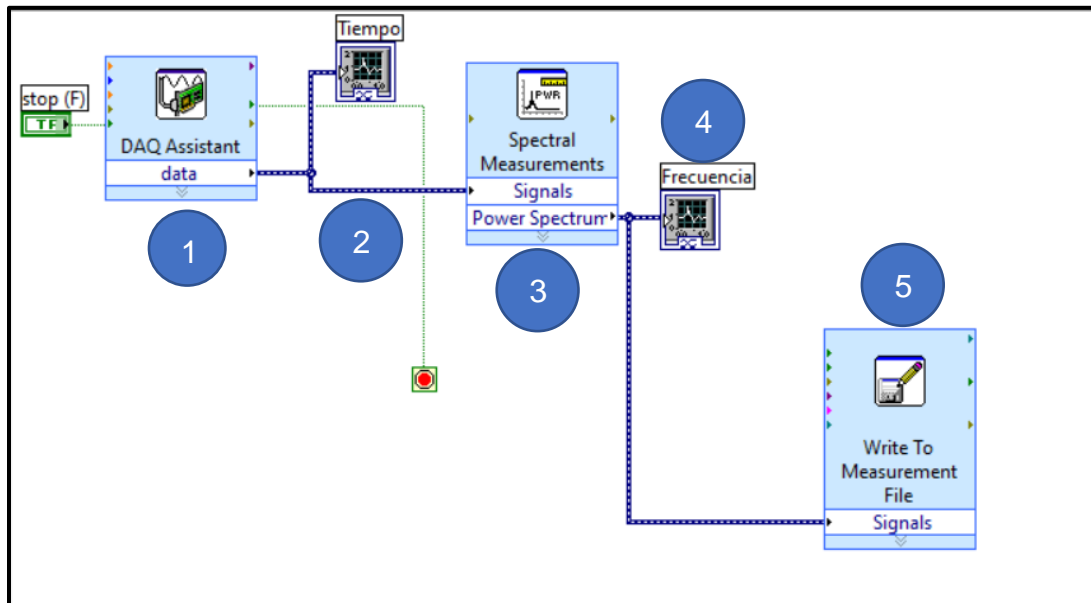


Figura 33. Programación de bloques para adquisición de datos.

Este archivo que se escribe en el anterior bloque 5, se utiliza para posteriormente hacer el procesamiento de las señales de vibración.

Véase anexo 1 para consultar software y hardware utilizado.

3.6 Realizar pruebas experimentales de cada una de las severidades seleccionadas

Para la realización de pruebas experimentales fue necesario definir una matriz de pruebas que comprenda las diferentes condiciones del engrane a estudiar y que incluya las frecuencias de operación que se eligieron en base a la recomendación de Nissan, donde recomienda que para alargar el tiempo de vida de los componentes en la caja de transmisión se debe de evitar ir a más de 2500 rpm y para la quinta de velocidad se recomienda una velocidad de 1500 rpm o superior a esta. La matriz de pruebas que se utilizó para el estudio se muestra en la tabla 1. El orden en el que se realizaron las pruebas es congruente con los números que aparecen en la matriz, es decir, primero se hizo de la prueba 1-4 (variando la frecuencia de operación) del engrano sano, y así prosiguió con el engrane con diente fracturado y el engrane con excentricidad.

Tabla 1. Matriz de pruebas.

Condición del engrane	Frecuencia de operación			
	30 Hz	40Hz	50Hz	60Hz
Sano	1	2	3	4
Diente fracturado	5	6	7	8
Engrane con excentricidad	9	10	11	12

Se tomaron 10 pruebas para cada frecuencia y al realizarlas se hizo una tabla adicional (Tabla 2), donde su primera columna contiene la frecuencia de trabajo en la que opero el variador de frecuencia, con esto además se pudo percibir si la falla alteraba la velocidad de salida del eje, también para utilizar el dato de la velocidad de salida para el cálculo de las frecuencias del engrane.

La velocidad del eje de entrada se calculó sabiendo que el motor ofrecía una frecuencia de 60Hz a 1750rpm, como se trata de un motor eléctrico a menor frecuencia, menor velocidad de giro, sabiendo esta relación de proporcionalidad es que se utilizó una regla de 3 para encontrar el valor de los rpm a las velocidades de 30, 40, 50 y 60Hz, estos datos se sitúan en la segunda columna. La regla de 3 nos dice que para que esta proporcionalidad se cumpla se tiene que a un aumento de la frecuencia del motor (A) le corresponde un aumento de la frecuencia de trabajo (B) en la misma proporción. Se puede representar de la forma:

$$Y = \frac{B \cdot X}{A} \quad (9)$$

donde X son las rpm a las que trabaja el motor, y Y es el valor en rpm de la velocidad del eje de entrada.

Por ejemplo, para 30Hz, se calculó cuantos rpm estaban presentes en eje con la ecuación 9:

$$rpm_{30Hz} = \frac{30Hz * 1750rpm}{60Hz} = 875 rpm$$

La velocidad del eje de salida se tomó con un tacómetro, estos datos fueron recopilados en la Tabla 2, en su tercera columna.

Tabla 2. Velocidad del eje de salida en la quinta marcha de la transmisión automotriz.

Engrane sano		
Frecuencia (Hz)	Velocidad del eje de entrada (rpm)	Velocidad del eje de salida (rpm)
30	875	1085
40	1166.67	1453
50	1458.33	1816.1
60	1750	2187.1
Engrane con diente fracturado		
30	875	1087.2
40	1166.67	1453.8
50	1458.33	1817.8
60	1750	2192.3
Engrane con excentricidad		
30	875	1092
40	1166.67	1456.6
50	1458.33	1830
60	1750	2198

Para el cálculo de la siguiente sección se utilizaron los datos de la tabla 2.

3.7 Procesamiento de las señales de vibración adquiridas

El procesamiento de las señales se realizó empleando dos técnicas de procesamiento diferentes, el tratamiento de la señal por medio del cálculo del valor RMS en el dominio del tiempo, y usando la transformada FFT en el dominio de la frecuencia. Para ambos procesos se utilizó el archivo de la adquisición de datos que se menciona en la sección 3.5.

3.7.1 Procesamiento mediante el dominio del tiempo

Para el procesamiento por valor RMS lo primero que se realizó fue calcular un promedio de las pruebas y de los estados estacionarios haciendo una segmentación en partes de 1 segundo del total de tiempo de la prueba. Es decir, en el archivo se tienen 240000 muestras para 47.9998 segundos, corresponden 5000 muestras por segundo, y los segundos útiles de la prueba son de los 10s a los 40s, de estos 30 segundos útiles se secciona por segundo y de ese segundo se hace un promedio, a este promedio se le aplica la ecuación (1), recordando que para esta ecuación el valor que se utiliza es el V_p .

Para entender este procedimiento se presenta la tabla 3 como un ejemplo simplificado de lo que se hizo, aquí se utilizaron solo 10 muestras del segundo 12 del experimento, y dos pruebas (cuando en realidad son 10 pruebas por cada estado y frecuencia de trabajo), a cada una de las pruebas se les saca un promedio, cabe aclarar

que los valores utilizados son Voltaje pico de la señal, se hace en la sexta columna un promedio de los valores promedio de las pruebas y a este resultado finalmente se le aplica la ecuación 1, y da el voltaje rms, este valor será de los que se vean reflejados en las gráficas de resultados.

Tabla 3. Cálculo de valor RMS de las pruebas (ejemplo simplificado).

Pruebas de engrane sano a una frecuencia de trabajo de 30 Hz, eje x.						
No. de muestra	Prueba 1	Prueba 2	Promedio prueba 1	Promedio prueba 2	Promedio de Pruebas	Valor rms calculado
Muestra 1	0.797635	0.135628	0.848971	0.316147	0.582559	0.411928
Muestra 2	0.90184	0.051344				
Muestra 3	0.69343	0.150952				
Muestra 4	1.04129	0.353232				
Muestra 5	0.828283	0.322583				
Muestra 6	0.814491	0.498812				
Muestra 7	0.756259	0.449775				
Muestra 8	0.995318	0.272013				
Muestra 9	0.727143	0.472761				
Muestra 10	0.934021	0.454372				

Este procesamiento se llevó a cabo con la plataforma de MATLAB® con un código que hace algo similar a lo que se muestra en la Tabla 3, pero a mayor escala para cubrir todas las condiciones del engrane: sano, con diente fracturado y con excentricidad. Como se había mencionado, las pruebas son en dos ejes, entonces el estudio se hizo con 120 pruebas (incluyendo todos los estados) por cada eje.

3.7.2 Procesamiento mediante el dominio de la frecuencia

Para el procesamiento de señales en el dominio de la frecuencia se implementó mediante descripción de código en MATLAB® la FFT en su forma discreta; incluso, se emplearon algunas de las funciones predefinidas con la que cuenta este software, que sirvió a pasar la señal muestreada del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia para así facilitar la identificación de amplitudes debido a la falla en el engrane. El código utilizado es uno para cada eje y en las distintas frecuencias de trabajo, las etapas se muestran en la Figura 34.

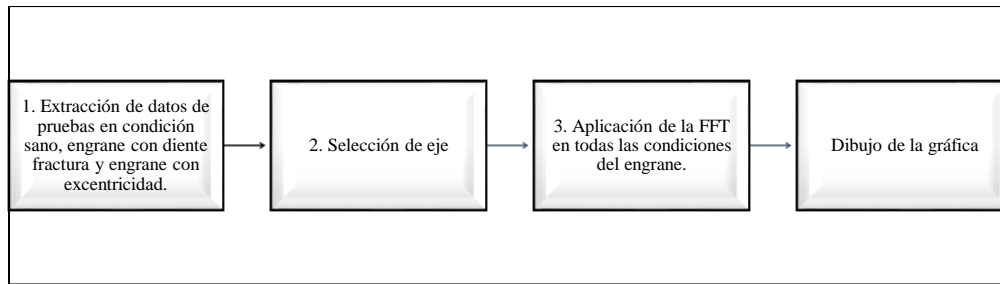


Figura 34. Diagrama de fases del código para procesamiento en el dominio de la frecuencia.

En la fase 1 se hace la lectura del documento mencionado en el paso 3.5 y se extraen los valores en las distintas condiciones del engrane, después se selecciona el eje mediante la elección de columna, es decir, el documento tiene tres columnas, el tiempo, el eje x, y el eje y, en la segunda fase se selecciona la columna 2 o 3 del documento según el eje que se esté analizando, posteriormente en la fase 3 se hace la aplicación de la FFT en los datos recolectados, para finalizar con el dibujo de la gráfica que muestra las distintas amplitudes según la frecuencia. Aquí comienza otro análisis para este procesamiento, y es la identificación de las frecuencias de engranaje. Con la ecuación 7 se realizó este análisis, y esta ecuación pide como dato N el número de dientes y f_r la frecuencia de rotación del eje de entrada o salida a analizar

$$f_m = N \cdot f_r$$

Para este cálculo se utilizan los datos de la tercera columna de la Tabla 2, la velocidad del eje de salida, para calcular la frecuencia de rotación del eje de salida donde está el engrane de nuestro interés. Además de la tabla se utilizó un diagrama de la transmisión para poder visualizar la velocidad del eje donde está el engrane, este diagrama se muestra en la figura 35.

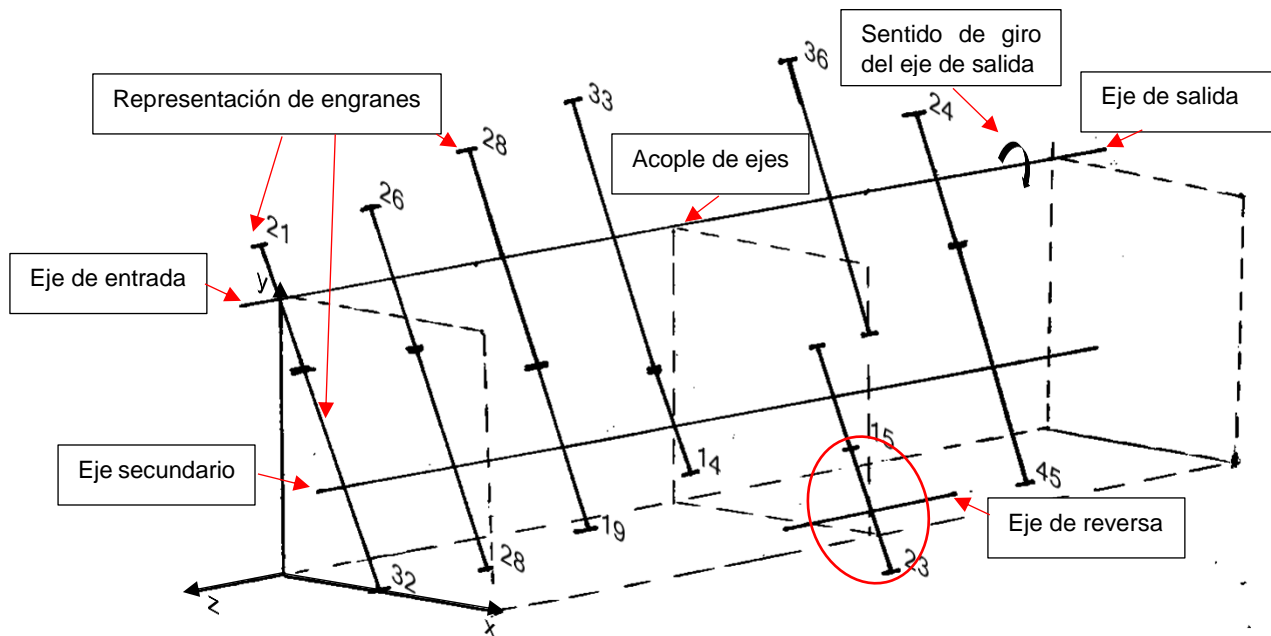


Figura 35. Diagrama de transmisión automotriz manual Nissan D21, en quinta marcha.

En la transmisión se indica con flechas los distintos ejes involucrados, el sentido del giro del eje de salida, la representación gráfica de los engranes y la unión que existe entre el eje de entrada y el eje de salida; los números al lado de los engranes son el número de dientes de cada engrane, el engrane con un círculo rojo alrededor es el engrane de 23 dientes que se utilizó para este experimento.

Se sabe que la velocidad del engrane de 24 dientes tiene la misma velocidad del eje de salida ya que en ese momento se encuentra en la quinta marcha, es ese engrane y el engrane de 45 dientes los que forman la quinta marcha. Se usó esta relación de la ecuación (1) para calcular así la velocidad del eje secundario, en este eje se encuentra el engrane de 15 dientes que para el momento de la quinta marcha está en contacto con el engrane de 23 dientes, el engrane de estudio, entonces con la misma relación anteriormente mencionada se calcula la velocidad de giro del engrane de interés. Posterior a ello se hace el cálculo en todos los casos.

Capítulo IV

4 Resultados

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos durante el caso de estudio de análisis de fractura de diente en engranes de transmisión, el daño causado por medio de herramientas de percusión, además del procesamiento de señales mediante los valores de voltaje RMS y por medio de la FFT, para hacer el análisis en el dominio del tiempo y en el de la frecuencia.

4.1 Inducción artificial del daño

Para el proceso de inducción del daño se utilizó un cincel y un martillo aplicando golpes continuos para romper la resistencia del material y así fracturar el diente. El daño causado en el engrane se puede visualizar en la Figura 36, a continuación:

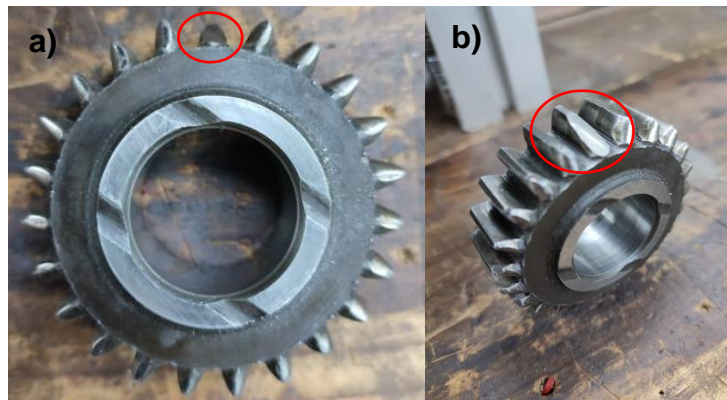


Figura 36. Fractura de diente en engrane (a) toma frontal y (b) toma isométrica.

Cada que se hacía un cambio de engrane se tenía que destapar la carcasa y vaciar el aceite, en total se hicieron 3 cambios, el engrane sano, el engrane con diente fracturado y el engrane con excentricidad, se hacía el ajuste de las demás piezas y se volvía a tapar. Después se acomodaba la palanca en la quinta marcha y se procedió a hacer la adquisición de los siguientes datos.

4.2 Adquisición de datos sin procesamiento

En esta sección se muestran algunas de las gráficas más significativas que se adquirieron del experimento presentadas directamente de como las tomo el monitor de NI, ya que no llevan ni un procesamiento, es la amplitud ($\frac{m}{s^2}$) contra el tiempo, en estas señales no es posible observar de manera simple si existe algún cambio debido a las fallas del engrane.

En la Figura 37 se puede observar la señal adquirida de la transmisión con el engrane sano a una frecuencia de trabajo de 30Hz, para posteriormente presentar la señal del engrane con excentricidad, pero a una frecuencia de trabajo de 60Hz, para así comprobar si es justificable pasar al dominio de la frecuencia.

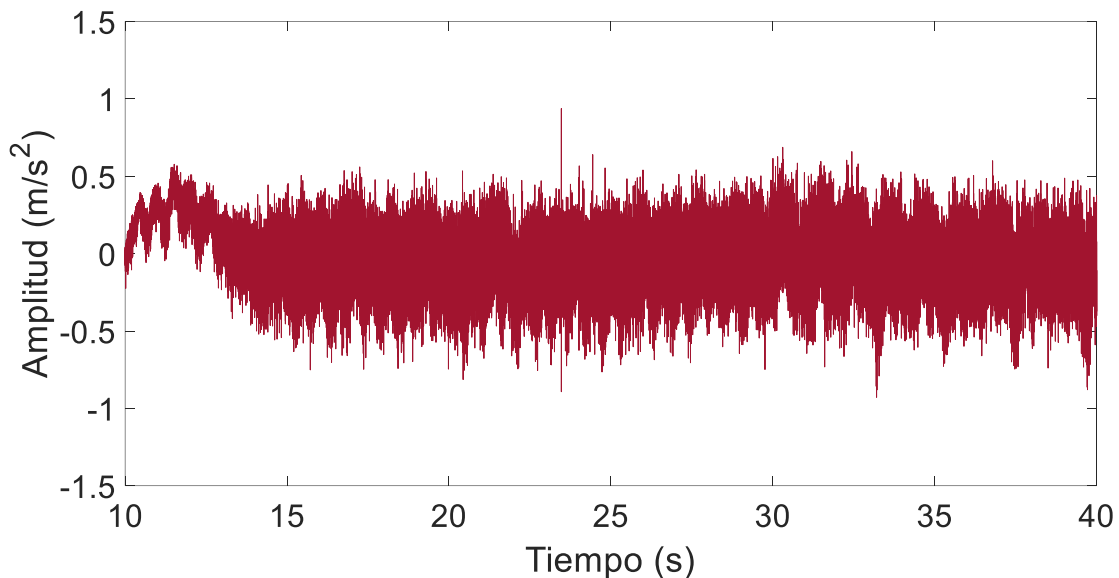


Figura 37. Señal sin procesamiento del engrane sano a frecuencia de trabajo 30Hz (eje x).

Lo que se observa en la Figura 37 y en la Figura 38 no denotan por sí mismas la existencia de la falla a una frecuencia de trabajo de 30Hz, aunque si contienen la información necesaria para la identificación de la falla mediante la extracción de los valores en el dominio de la frecuencia usando la FTT.

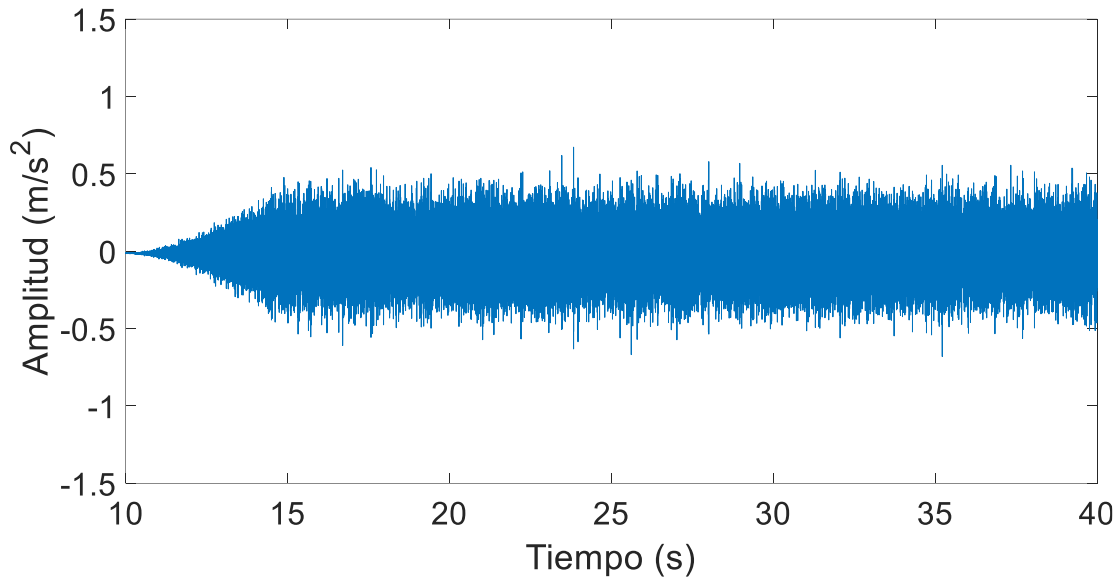


Figura 38. Señal de engrane sano sin procesamiento a una frecuencia de trabajo de 30Hz (eje y).

Al comparar las señales sin procesamiento del engrane sano en los límites opuestos, es decir, en la frecuencia de trabajo de 30Hz (Figura 37 y 38) y de 60Hz (Figura 39 y 40), se puede observar un claro aumento en la amplitud, cuando aumenta la frecuencia de trabajo.

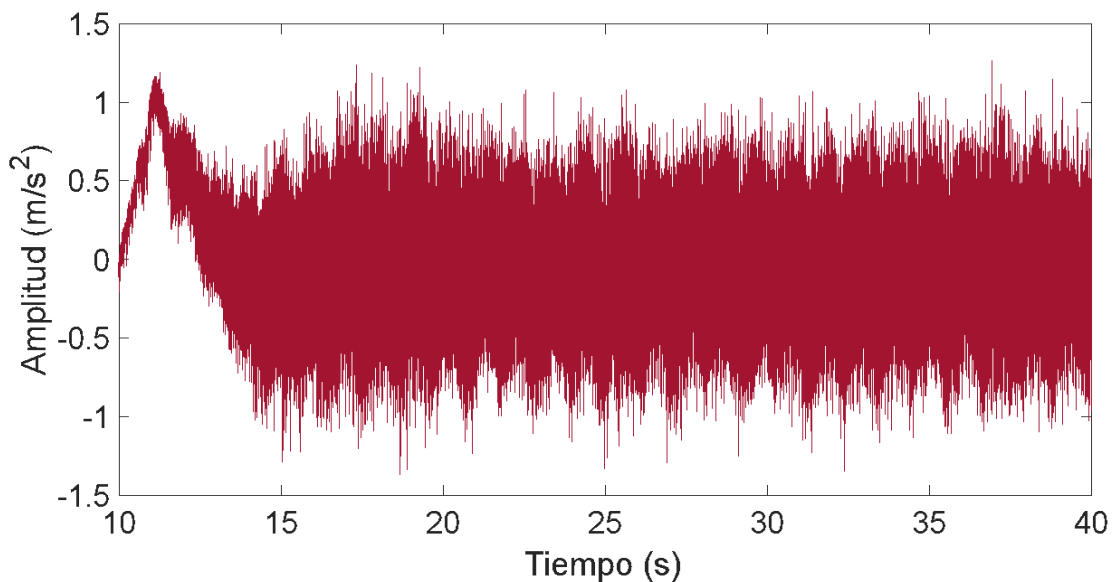


Figura 39. Señal sin procesamiento del engrane sano a frecuencia de trabajo 60Hz (eje x).

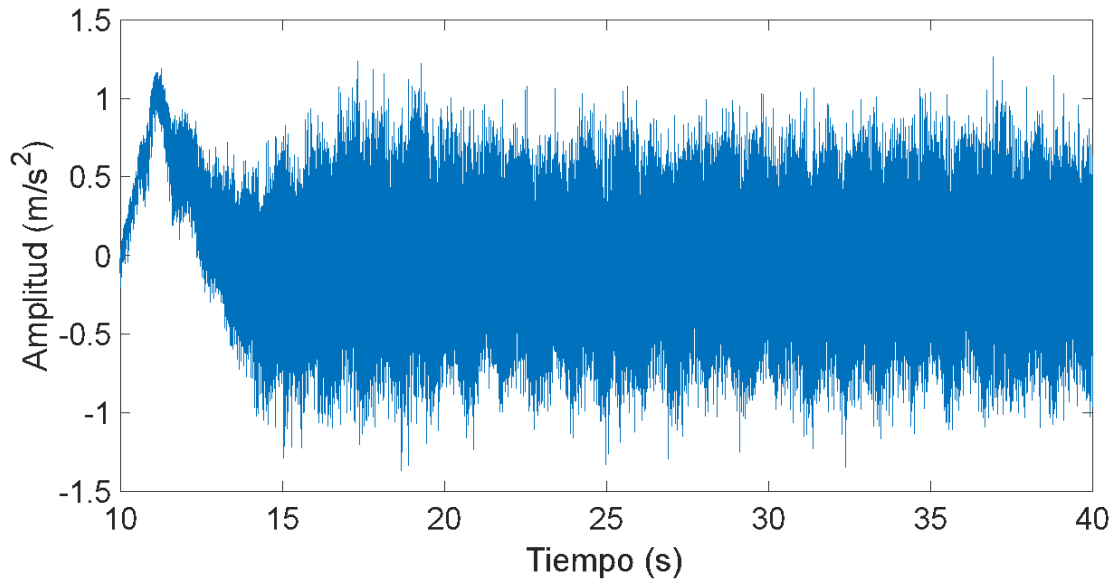


Figura 40. Señal de engrane sano sin procesamiento a una frecuencia de trabajo de 60Hz (eje y).

En las figuras del engrane sano (Figura 37-40) se observa que estas tienen una amplitud menor que las demás señales, lo que ya es un punto a favor del experimento, mostrando que el funcionamiento de la transmisión cambia de acuerdo al estado de uno de sus componentes (un engrane), y la frecuencia a la que trabaja, pero dentro de esta señal no es posible identificar la frecuencia del engrane, por lo que se opta por procesar la señal, en el dominio del tiempo y en el dominio de la frecuencia. A continuación, en las Figuras 41 y 42 se muestran las señales en una frecuencia de trabajo de 60Hz para el engrane con excentricidad, sin procesamiento.

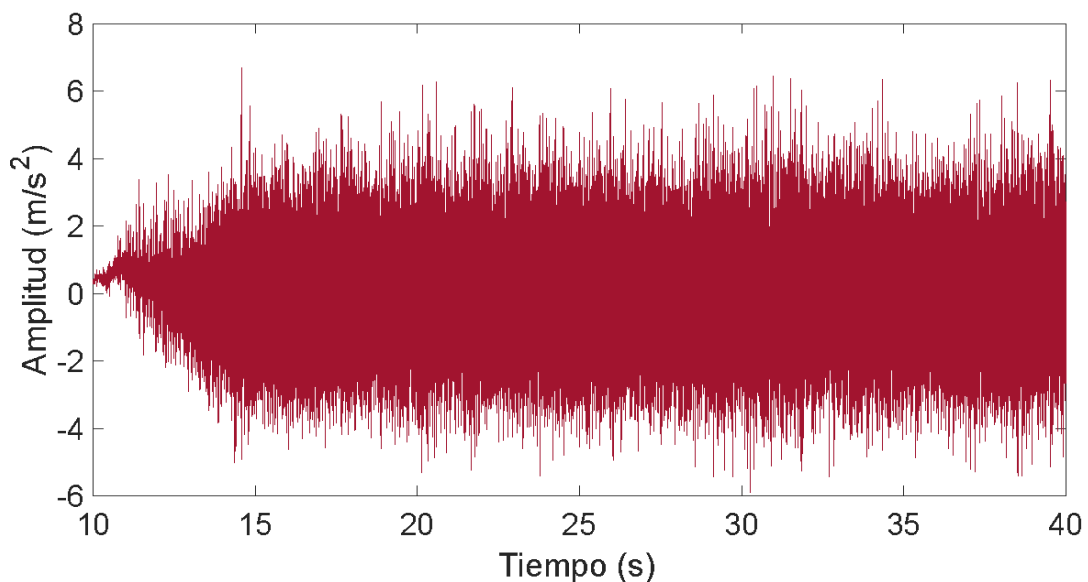


Figura 41. Señal de engrane con excentricidad sin procesamiento a una frecuencia de trabajo de 60Hz (eje x).

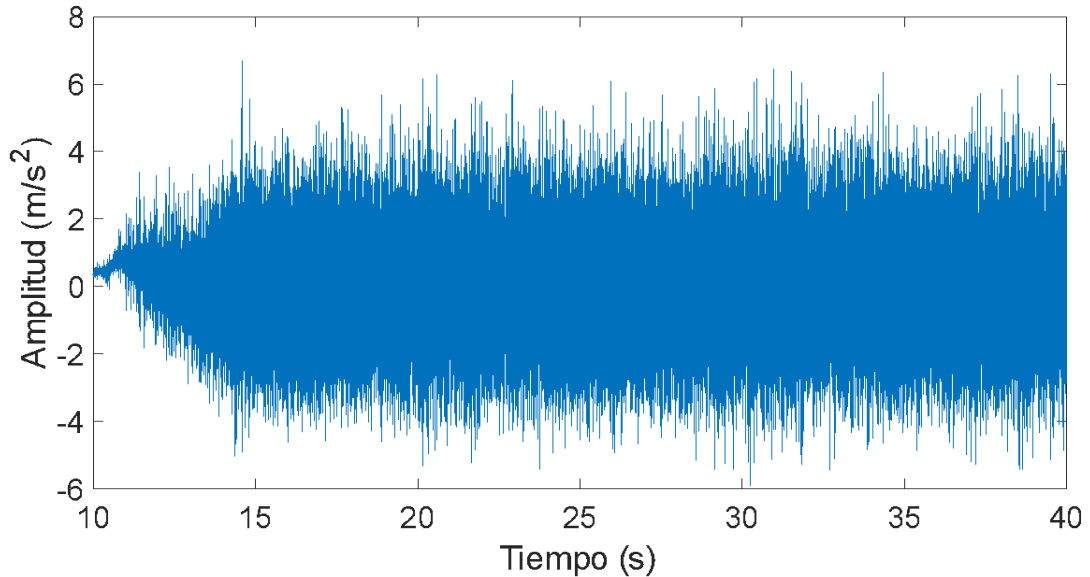


Figura 42. Señal de engrane con excentricidad sin procesamiento a una frecuencia de trabajo de 60Hz (eje y).

Comparando estas señales con las de una frecuencia de trabajo de 30Hz se puede ver que la amplitud se ve comprometida y que existe un cambio notorio respecto a las distintas condiciones, aun así, en estas gráficas no se puede identificar que sea el engrane el que está causando esto. Por ello pasamos al procesamiento de la señal, primero en el dominio del tiempo y después en el dominio de la frecuencia.

4.3 Adquisición de datos con procesamiento de la señal

En esta sección primero se hizo el análisis en el dominio del tiempo ya que en las señales sin procesamiento el tiempo sigue siendo un factor importante, entonces se selecciona primero este dominio para no perder el flujo que llevan las gráficas, con la excepción de que ahora es V_{RMS} respecto al tiempo.

4.3.1 Procesamiento en el dominio del tiempo

En la metodología se mencionó el procedimiento para calcular el V_{RMS} de la señal en los segundos útiles (10 segundos- 40 segundos), y con ayuda de la formula (2). La primera grafica que se presenta es la del engrane en sus distintas condiciones a una frecuencia de 30Hz.

La Figura 43 señala los valores encontrados en los 20 segundos, y se puede observar que el valor de Y va en aumento según la falla, cuando se analiza el engrane sano $Y=0.5092$, para el engrane con diente fracturado $Y=1.029$ y finalmente para cuando el engrane tiene excentricidad $Y=1.868$. Desde las gráficas sin procesamiento se observa algo, que es, el fallo por excentricidad causa un mayor impacto en el funcionamiento de la transmisión que el fallo por diente fracturado. Esta afirmación se fue comparando en las gráficas de la Figura 43-50.

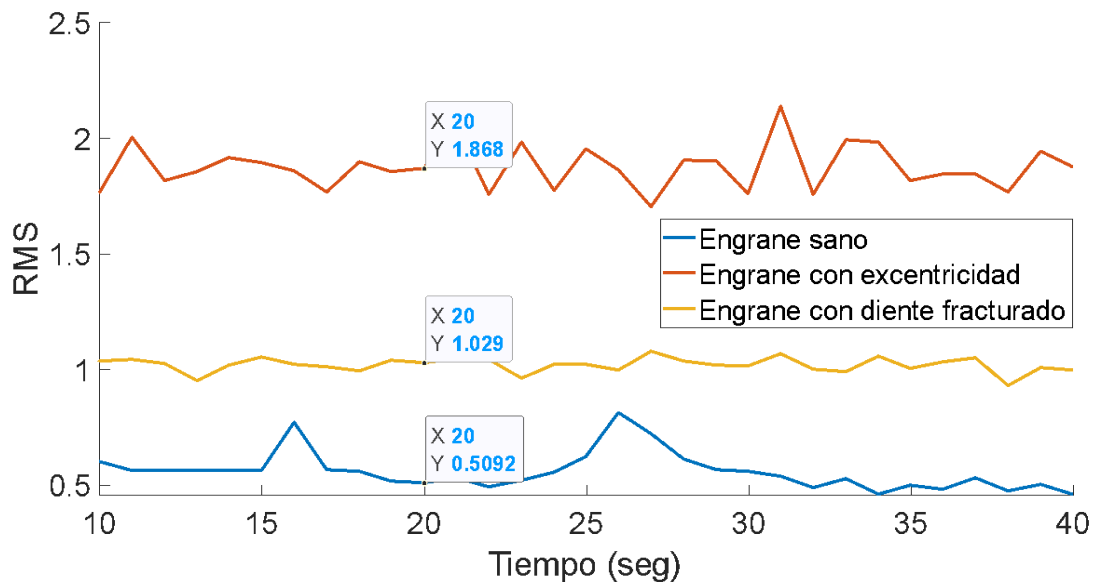


Figura 43. Valor Rms en una frecuencia de trabajo de 30Hz (eje x).

La Figura 44 señala también los valores encontrados en los 20 segundos, esto para poder hacer una comparativa así en todas las gráficas de V_{RMS} , y se puede observar que el valor de Y va en aumento según la falla, cuando se analiza el engrane sano $Y=0.4358$, para el engrane con diente fracturado $Y=1.52$ y finalmente para cuando el engrane tiene excentricidad $Y=2.545$.

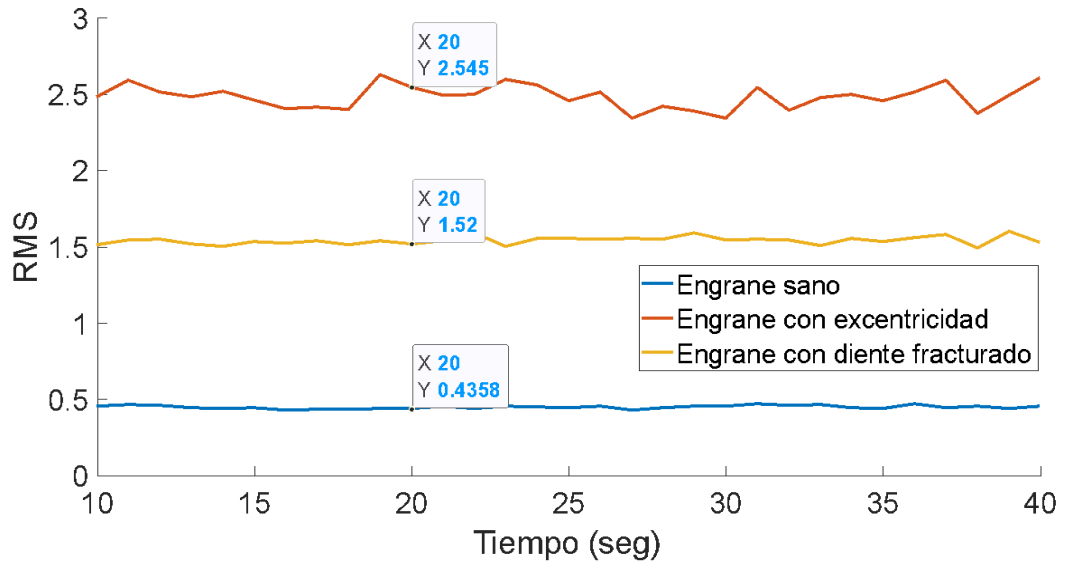


Figura 44. Valor Rms en una frecuencia de trabajo de 30Hz (eje y).

En las figuras 45 y 46 se observa un comportamiento similar a las anteriores gráficas, a excepción de que los valores de V_{RMS} van en aumento, y en este momento se puede hacer ya otra afirmación, existe un mayor impacto en el eje y (que fue nombrado en la sección 3.4 de la metodología) respecto al funcionamiento de la transmisión automotriz.

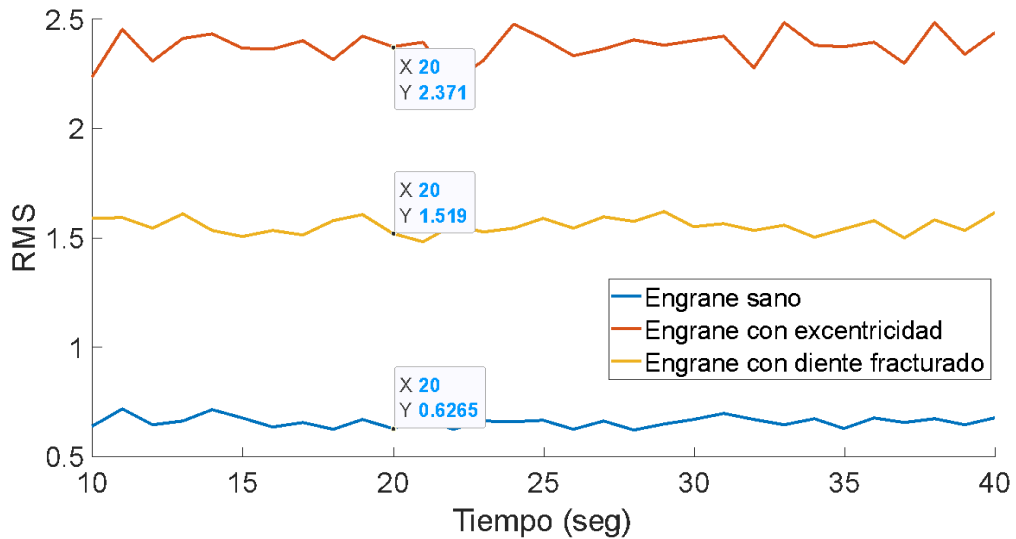


Figura 45. Valor Rms en una frecuencia de trabajo de 40Hz (eje x).

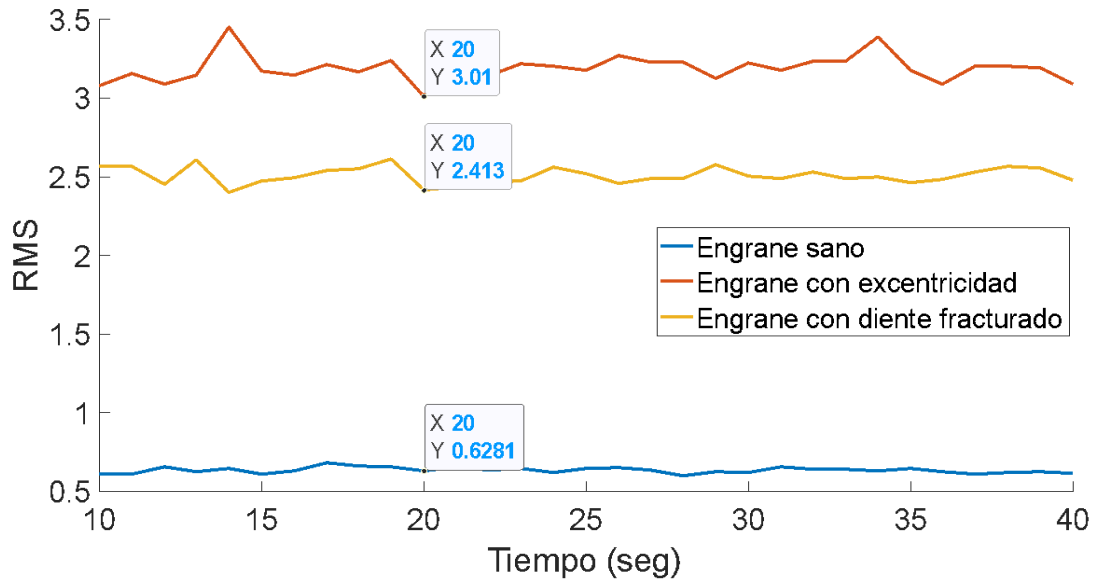


Figura 46. Valor Rms en una frecuencia de trabajo de 40Hz (eje y).

En las Figuras 47 y 48 se nota un cambio considerable de los valores RMS, por ejemplo, cuando se analiza el engrane sano (en el eje y) $Y=0.7191$, y en la anterior frecuencia de trabajo era $Y=0.6281$, para el engrane con excentricidad $Y=3.522$ y en la frecuencia de trabajo de 30Hz $Y=3.01$.

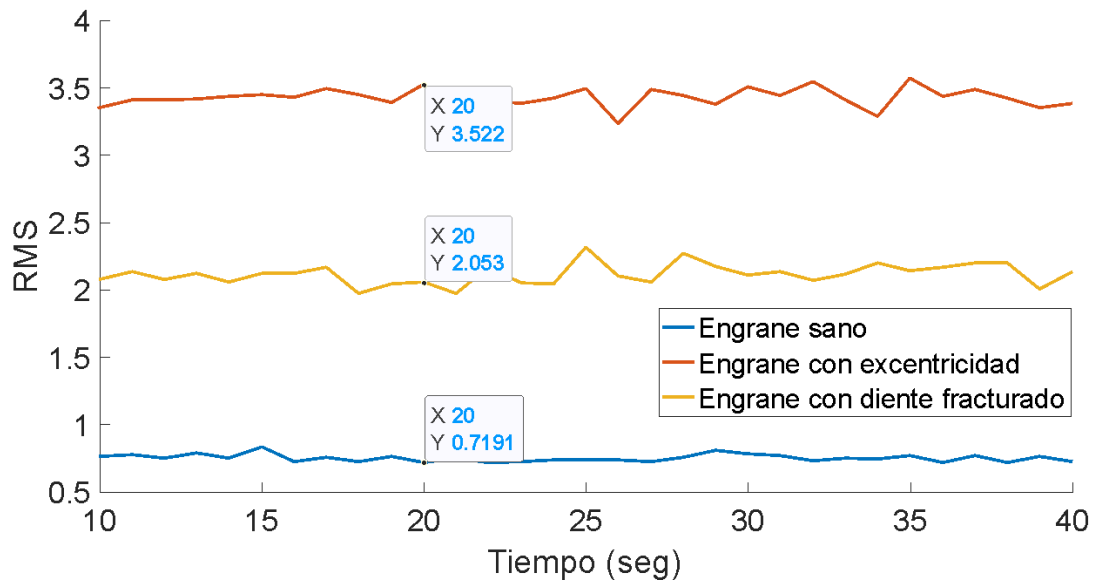


Figura 47. Valor Rms en una frecuencia de trabajo de 50Hz (eje x).

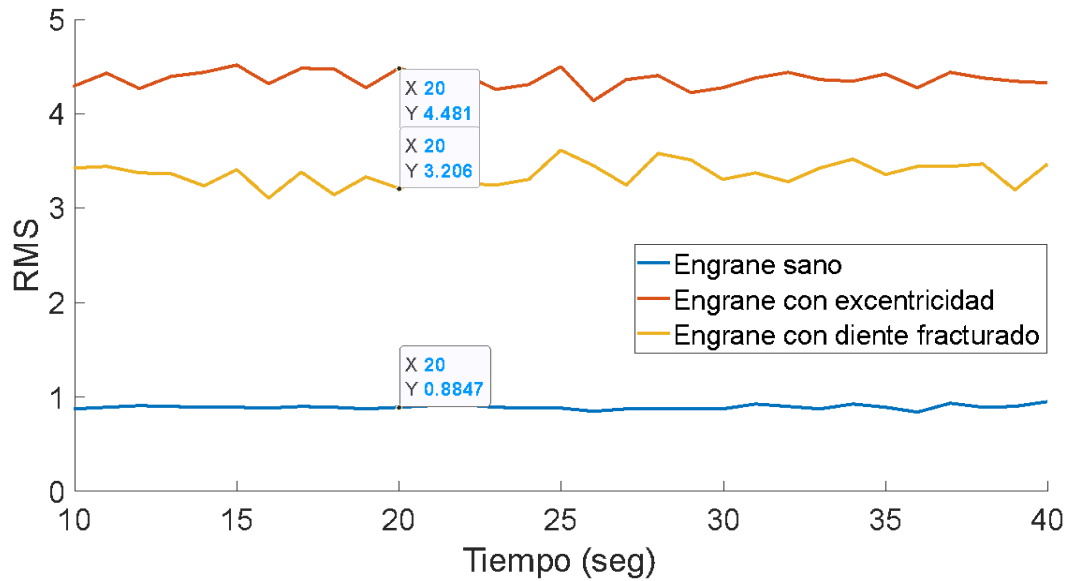


Figura 48. Valor Rms en una frecuencia de trabajo de 50Hz (eje y).

Nótese que en este caso el valor RMS para el engrane con diente fracturado no aumento respecto la frecuencia de trabajo anterior.

Por último se presenta la gráfica de valores obtenidos para una frecuencia de trabajo de 60Hz en la Figura 49 y 50, observando estos valores se puede hacer una última afirmación comparando con las anteriores gráficas, entre mayor es la frecuencia de trabajo, más notorio es el impacto que tiene la condición del engrane en el funcionamiento de la transmisión.

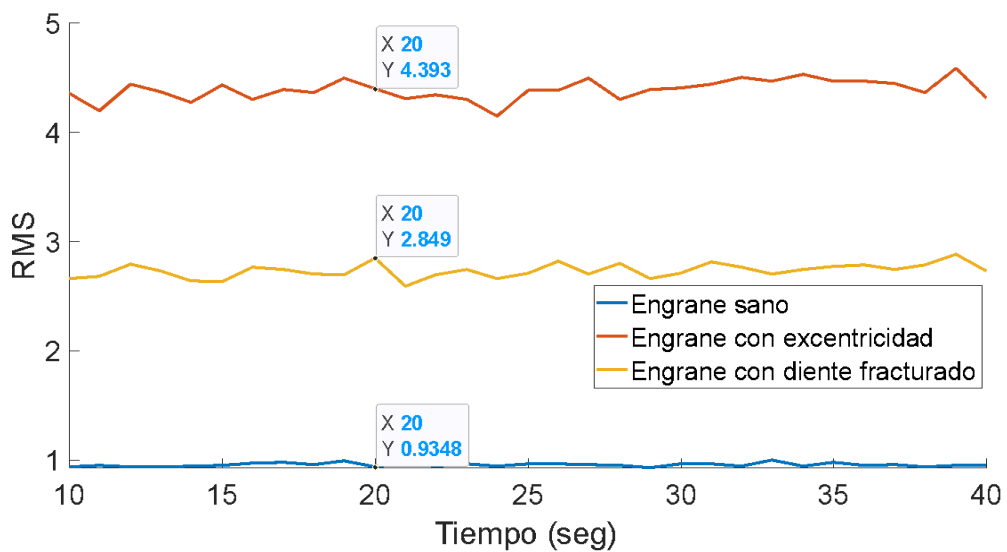


Figura 49 . Valor Rms en una frecuencia de trabajo de 60Hz (eje x).

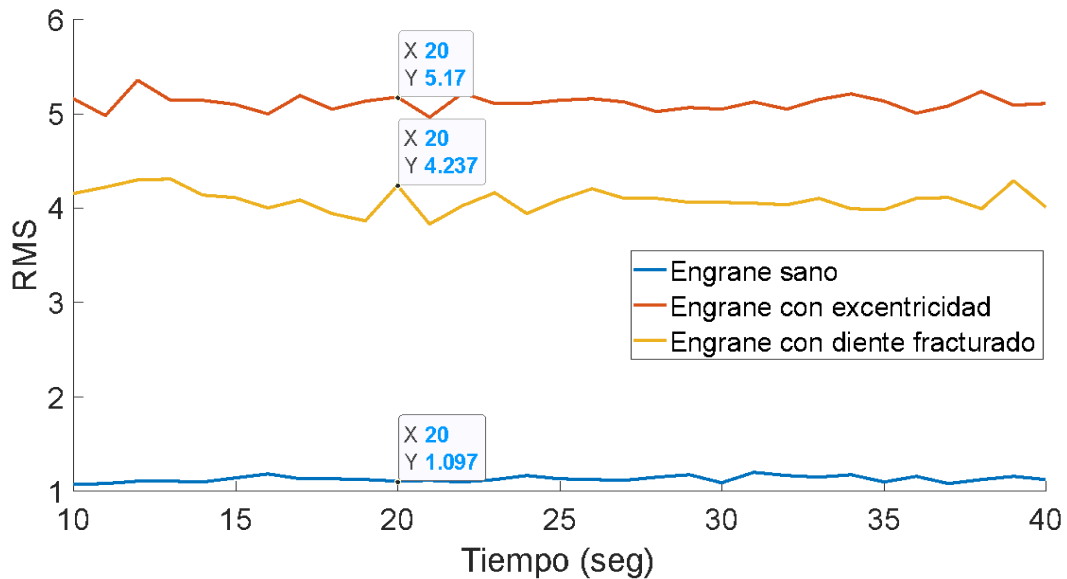


Figura 50 . Valor Rms en una frecuencia de trabajo de 60Hz (eje y).

4.3.2 Procesamiento en el dominio de la frecuencia

Posteriormente se realizó el análisis en el dominio de la frecuencia para cada una de las pruebas experimentales realizadas en la transmisión, en diferentes frecuencias de trabajo. Dicho análisis consistió en procesar las señales adquiridas mediante la FFT, además se calcularon las frecuencias de engranaje, de esta forma se podrían comparar los valores de frecuencia y comparar si estos se ven afectados conforme la falla presente en el engrane. Para entender mejor este cálculo de la frecuencia de engranaje, se toma como ejemplo el primer cálculo para encontrar la frecuencia de engranaje del engrane de 23 dientes.

En la tabla 2, tercera columna, se tiene que la velocidad de salida con una frecuencia de trabajo de 30Hz, en el engrane sano, es de 1085 rpm, entonces convertimos esa velocidad en rpm a Hz, dando aproximadamente 18.08 Hz, con esto se utiliza

la relación de la ecuación (1):

$$\begin{aligned}
 n_1 * z_1 &= n_2 * z_2 \\
 18.08\text{Hz} * 24 &= n_2 * 45 \\
 n_{\text{engrane de 45 dientes}} &= \frac{24}{45} * (18.08\text{Hz}) = 9.64\text{Hz}
 \end{aligned}$$

Ahora que ya se tiene la velocidad del eje secundario es posible saber la velocidad del eje de reversa ya que en este caso como no está en la marcha de reversa se mueven a la misma velocidad. Entonces, la velocidad del eje donde está el engrane de 15 dientes es de 9.64Hz, con este dato y la ecuación 2 tiene una velocidad de:

$$f_{m_{15\text{dientes}}} = 15 \cdot 9.64\text{Hz} = 144.6\text{ Hz}$$

O bien, se calcula la velocidad del eje de reversa, con el engrane de 23 dientes y la ecuación 1:

$$\begin{aligned} n_1 * z_1 &= n_2 * z_2 \\ 9.64\text{Hz} * 15 &= n_2 * 23 \\ n_{\text{engrane de 23 dientes}} &= \frac{15}{23} * (9.64\text{Hz}) = 6.3\text{Hz} = 377.41\text{ rpm} \end{aligned}$$

Con este procedimiento se llenó la segunda columna de la Tabla 4, que es la velocidad del eje en rpm.

$$f_{m_{23\text{dientes}}} = 23 * 6.3\text{Hz} = 144.674\text{ Hz}$$

Y con el cálculo de la frecuencia de engranaje, similar al que se realizó para el engrane de 23 dientes, se llenó la columna 3 de la tabla 4. Y así se elaboró una tabla que contiene todos los valores de la frecuencia de engranaje en los distintos casos de la matriz de pruebas, que se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4. Frecuencia de engranaje

Frecuencia de trabajo a 30Hz		
	Velocidad del eje (rpm)	Frecuencia de engranaje (Hz)
		f_m
estado sano	377.41	144.674
estado fractura	378.16	144.961
estado excentricidad	380	145.667
Frecuencia de trabajo a 40Hz		
	Velocidad del eje (rpm)	Frecuencia de engranaje (Hz)
		f_m
estado sano	505.49	193.77

estado fractura	505.67	193.84
estado excentricidad	506.64	194.21
Frecuencia de trabajo a 50Hz		
	Velocidad del eje (rpm)	Frecuencia de engranaje (Hz)
		f_m
estado sano	631.69	242.15
estado fractura	632.28	242.37
estado excentricidad	636.52	244.00
Frecuencia de trabajo a 60Hz		
	Velocidad del eje (rpm)	Frecuencia de engranaje (Hz)
		f_m
estado sano	760.73	291.61
estado fractura	762.54	292.31
estado excentricidad	764.52	293.07

Estos valores que se encuentran en la tercera columna son la frecuencia de engranaje de interés en las distintas condiciones y frecuencias de trabajo, y sirven para identificarlos en las gráficas de la señal en el dominio del tiempo, para así comprar si existen cambios debido a las fallas.

A continuación, se presentan las gráficas obtenidas aplicando la FTT a la señal inicialmente adquirida con el monitor SCXI-1000 de NI. En las Figuras 51 y 52, se encuentran las gráficas obtenidas después del procesamiento de la señal, en ellas se marca los valores de f_m encontrados en la Tabla 4. Lo que se observa en estas gráficas, respecto al eje x y el eje y es que la afirmación de que el fallo por un engrane con excentricidad causa mayor impacto en el funcionamiento de la transmisión si aplica. Y en estas gráficas es muy notorio esa diferencia de amplitud.

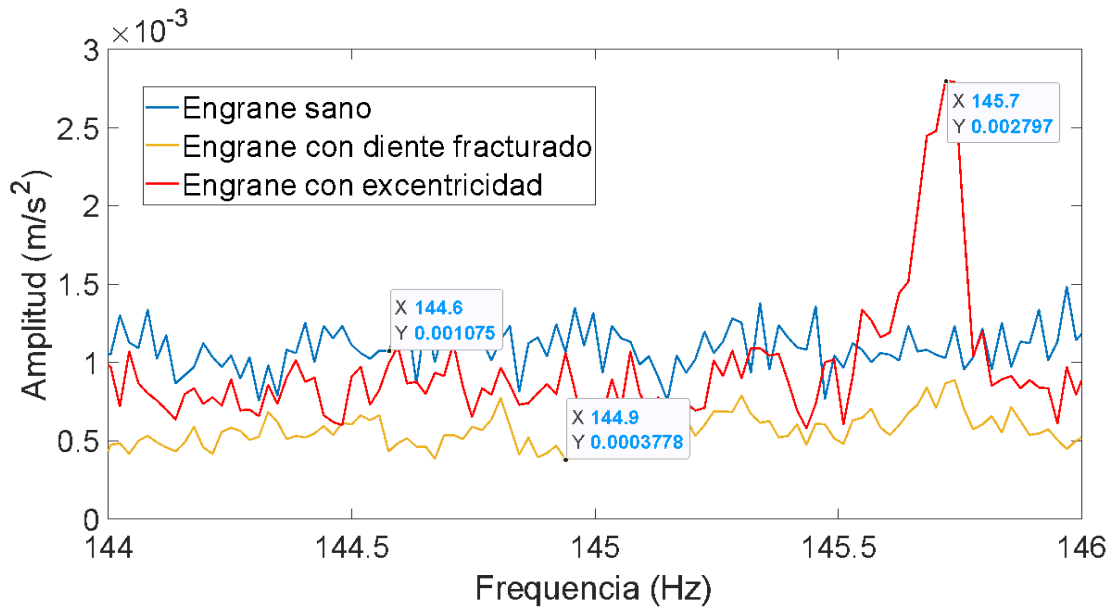


Figura 51. Espectros de vibración del experimento con el variador de frecuencia a 30Hz (eje x).

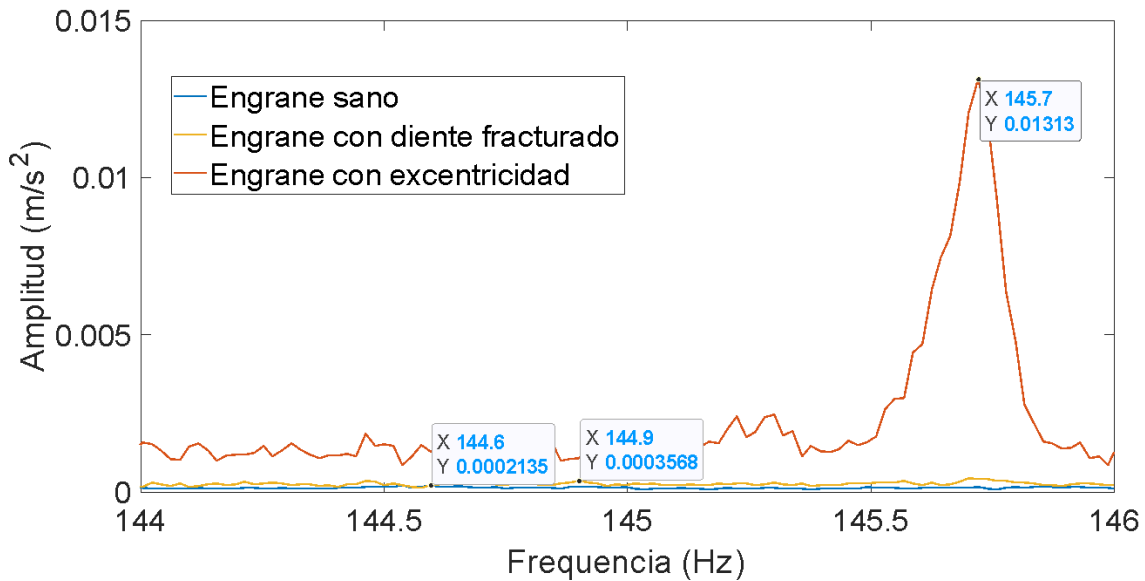


Figura 52. Espectros de vibración del experimento con el variador de frecuencia a 30Hz (eje y).

En las siguientes Figuras, 53 y 54 se puede observar que los valores de Y van en aumento respecto a la frecuencia de trabajo anterior ya que para el engrane sano $Y=0.0003367$, para el engrane con diente fracturado $Y=0.0009608$ y para el engrane con excentricidad $Y=0.007261$, lo que demuestra la afirmación del procesamiento anterior, que existe un mayor impacto en el eje y.

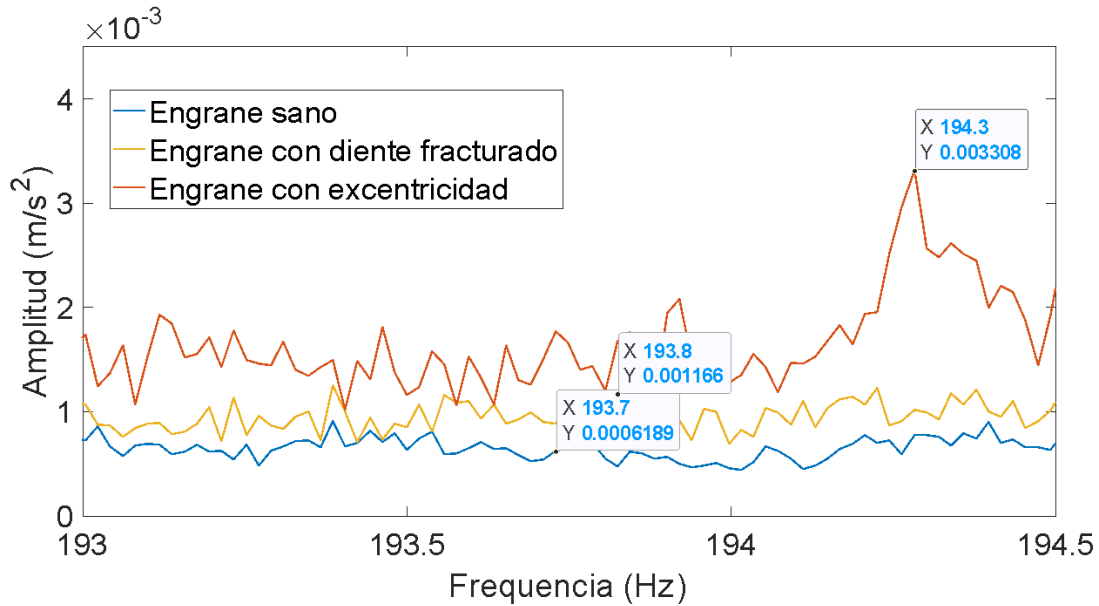


Figura 53. Espectros de vibración del experimento con el variador de frecuencia a 40Hz (eje x).

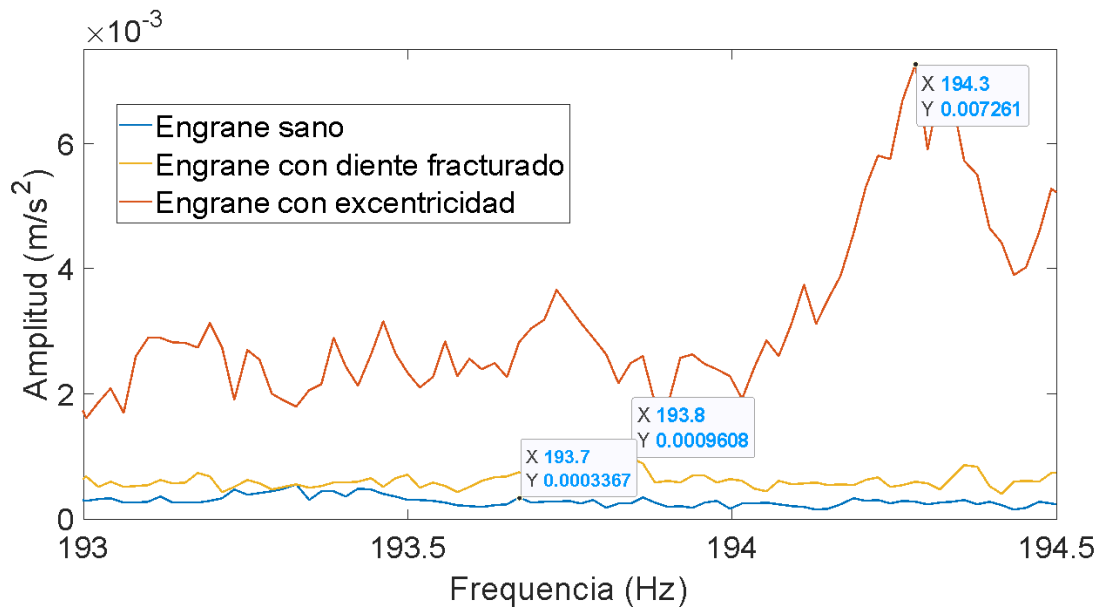


Figura 54. Espectros de vibración del experimento con el variador de frecuencia a 40Hz (eje y).

En las Figuras 55 y 56 se nota un cambio considerable de los valores de amplitud respecto a la frecuencia de trabajo vista en la Figura 54, por ejemplo, cuando se analiza la gráfica de la Figura 56 el engrane sano (en el eje y) $Y=0.0003152$ y en la Figura 54 la frecuencia de trabajo era $Y=0.0003367$, para el engrane con excentricidad en la Figura 54 $Y=0.007261$ y en la Figura 56 $Y=0.01771$.

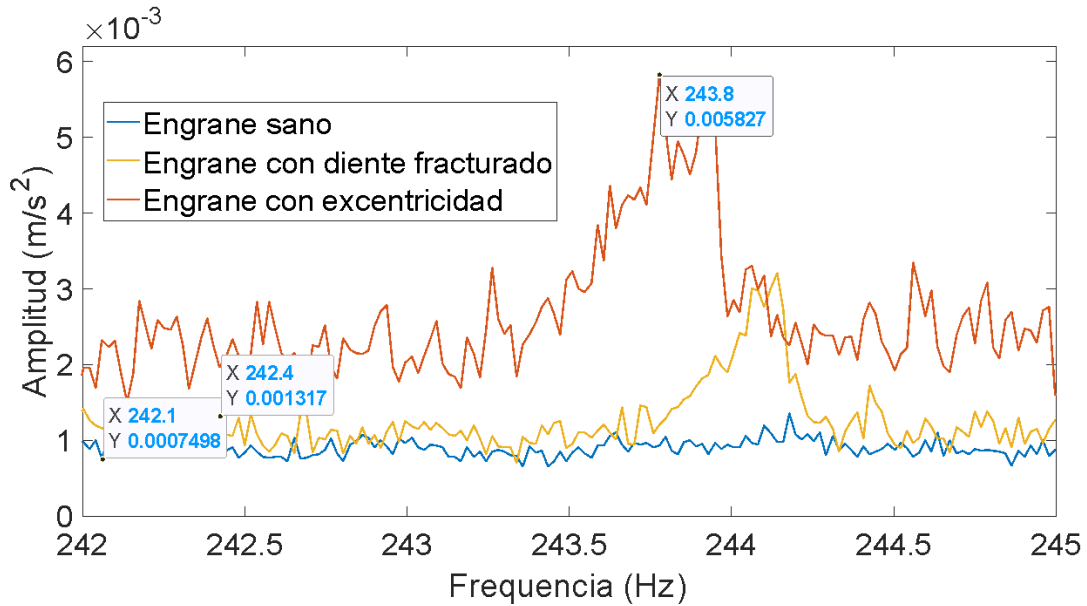


Figura 55. Espectros de vibración del experimento con el variador de frecuencia a 50Hz (eje x).

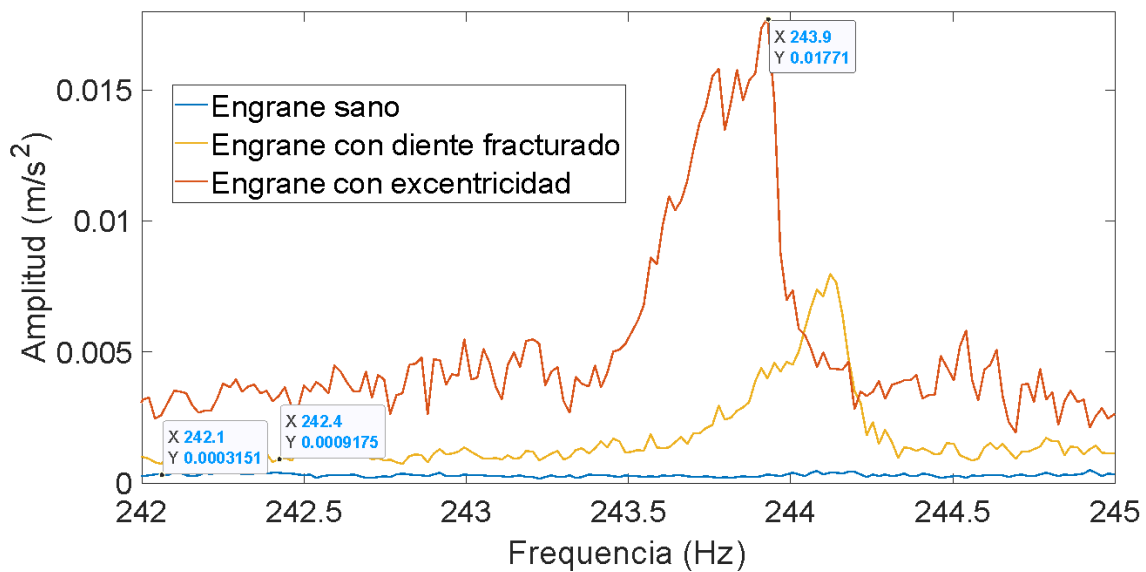


Figura 56. Espectros de vibración del experimento con el variador de frecuencia a 50Hz (eje y).

En las Figuras 57 y 58 los valores obtenidos para una frecuencia de trabajo de 60Hz confirman lo que se supuso en el procesamiento en el dominio del tiempo, entre mayor es la frecuencia de trabajo, más notorio es el impacto que tiene la condición del engrane en el funcionamiento de la transmisión, por ejemplo comparando valores del eje y en el espectro de vibración de 30Hz y 60Hz, tenemos que para un engrane con excentricidad a 30Hz $Y = 0.01313$ y para el engrane con excentricidad a 60Hz $Y = 0.01586$

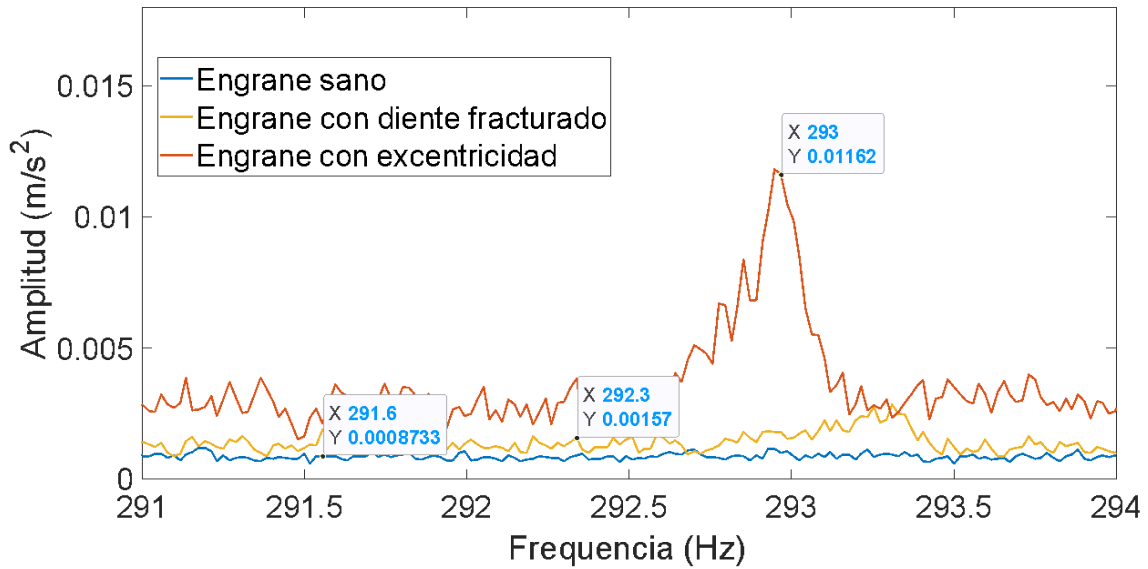


Figura 57 . Espectros de vibración del experimento con el variador de frecuencia a 60Hz (eje x).

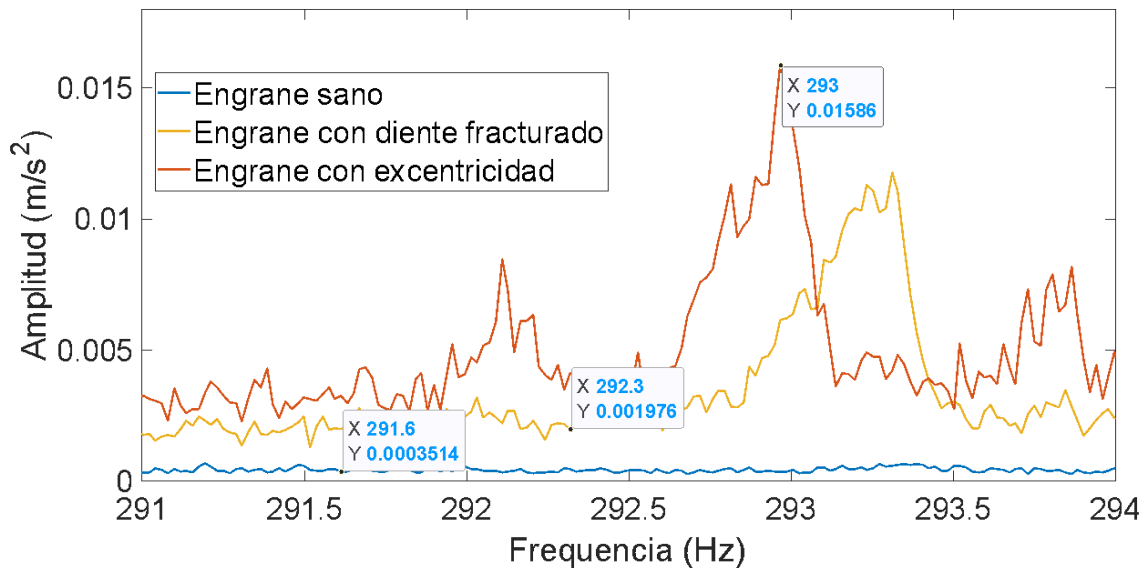


Figura 58 . Espectros de vibración del experimento con el variador de frecuencia a 60Hz (eje y).

Capítulo V.

5.1 Conclusiones

En esta tesis se realizó el análisis de la fractura en dientes de engrane de una transmisión automotriz manual mediante el procesamiento de señales de vibración en el dominio del tiempo y dominio de la frecuencia; algunos de los aspectos más relevantes a destacar de este trabajo son los siguientes:

- Se desarrolló una bancada experimental, constituida por una transmisión automotriz manual impulsada por un motor de inducción, en la que se realizó el estudio de la fractura de un engrane, así como la evaluación de engranes con excentricidad. La construcción dicho banco experimental queda disponible para futuros análisis de laboratorio en el campo automotriz.
- Se evaluaron las condiciones de engrane sano, engrane con diente fracturado y engrane con excentricidad, cada condición se evaluó bajo distintas velocidades de operación. Los resultados demuestran que el incremento en el valor RMS de las señales de vibración es un indicador asociado con la aparición de fallas en la transmisión; por otro lado, el incremento en la amplitud en la frecuencia de engranaje sobre espectros de Fourier también está asociados con la aparición de fallas en la transmisión.
- El incremento de los niveles de vibración en la transición este asociado con la severidad del fallo que pudiera estar presente, es decir, la fractura parcial de un diente de engrane incrementa la cantidad de vibraciones y afecta la operación de misma transmisión; pero, las vibraciones generadas por un engrane con excentricidad podrían considerarse críticas e incluso podrían generar daños estructurales en toda la transmisión.
- Finalmente, con este trabajo, se logró establecer una metodología de condición de monitoreo y diagnóstico basada en el análisis de señales de vibración para la detección de fallos en transmisiones manuales automotrices, los resultados obtenidos muestran que el análisis de señales de vibración es una técnica fiable que puede conducir a la detección temprana de fallas.

5.2 Prospectivas

El presente trabajo se centró en el estudiar los efectos que la falla de fractura de diente de engrane produce en un a trasmisión manual automotriz, enseguida se establecen algunas prospectivas que pueden considerarse en trabajos futuros en donde se busque mantener el buen funcionamiento de las transmisiones manuales automotrices:

- Considerar el análisis de diferentes severidades en la fractura del diente de engrane, desde un nivel de severidad incipiente hasta severo, es importante ya que ayudaría a la detección temprana del fallo evitando daños catastróficos.
- Ampliar el estudio a otros tipos de fallas como desgaste gradual uniforme, la corrosión e indentación sería de interés debido a que son tipos de fallos que comúnmente afectan a transmisiones manuales automotrices.
- Analizar otras magnitudes diferentes también debería de considerarse con la finalidad de estudiar repercusiones adicionales generadas por la falla en engranes, por ejemplo, el sonido.
- Realizar la implementación de la presente metodología en una plataforma hardware, como un microcontrolador, es interesante ya que podría emplearse como herramienta de diagnóstico en centros o talleres técnicos dedicados al mantenimiento automotriz; esto último, con la finalidad de generar respuestas tempranas en la identificación de anomalías en trasmisiones manuales automotrices.

Capítulo VI

Referencias

Álvarez, S., (2020), 6 síntomas que indican problemas en la caja de cambios automática de tu coche, DIARIOMOTOR.

Amézquita Sánchez, J.P., (2012), Monitoreo de vibraciones en tiempo real para detectar daños en estructuras.

Arellano García, C., (2021), Cada año 16 mil muertes por accidentes de tránsito en México: Anasevi, La Jornada.

Bardahl, (2021), ¿Cuál es la Función del diferencial?, tomado de:
<https://www.bardahl.com.mx/cual-es-la-funcion-del-diferencial/>

Benítez Hernández, L.P., (1985), Las fallas en los engranajes, Ingeniería Mecánica. ISSN 0120-5609.

Budynas, R.G, Nisbett, J.K, (2008), Diseño en ingeniería mecánica de Shigley (8va edición), McGraw Hill.

Cadina Morales, O., (2011), Análisis tiempo-frecuencia de señales de vibraciones mecánicas para la detección de fallos en máquinas rotativas.

Camacho Guadalupe, J. D., Granados Hernández, E., Gonzales Velázquez, D., (2009), Análisis de la caja de reducción y transmisión para un vehículo arenero.

Chingal, D., Sánchez, V., Cabrera, D., Cerrada, M., Vásquez, R., (2019), Comparación de señales de vibración y corriente para la detección de la severidad de fallos en engranajes.

CLR, (2022), Tipos de engranajes y sus aplicaciones, CLR Compañía Levantina de Reductores, tomado de: <https://clr.es/blog/es/tipos-de-engranajes-y-sus-aplicaciones/>.

De Fermín Reyes, D., (2020), Aplicaciones de engranajes y sus tipos.

Del Ángel Valerio, M., (2014), Instrumentación y procesamiento digital de señales en hardware aplicado a engranes dañados.

Del Castillo Rodríguez, F. D., (2013), ENGRANES: HISTORIA, FABRICACIÓN Y FALLAS,62-79.

Díaz Montano, E., (2014), SISTEMA EXPERTO PROTOTIPO PARA ANÁLISIS DE FALLA EN ENGRANES.

Díaz, N., (2008), Sistema de transmisión y frenado grado medio, Macmillan.

Energía Controlada de México, (2023), ¿Cómo funciona un reductor de velocidad?, tomado de: <https://energiacontrolada.com/faq/Como-funciona-un-Reductor>

Espejo Mora, E., Martínez, J. C., (2008), MODOS DE FALLA COMUNES EN ENGRANAJES.

Fernández, A., (2020), KIA presenta una innovadora caja de cambios manual para coches híbridos ligeros, motor.es, motor.es/noticias/kia-caja-cambios-manual-hibridos-ligeros-202068573.html.

FMUSER., (2021), ¿Qué es el voltaje RMS? Teoría y su ecuación, tomado de: <https://www.citethisforme.com/bibliographies/d9fb731b-a1e4-4d6a-904c-320e69c714b4>

Gavilán Moreno, C. J., (2007), El flujo Biestable en lazos de recirculación de una central BWR. Análisis y caracterización, XXXIII Reunión de la Sociedad Nuclear española, Segovia.

Gómez Flores, W., (2020), Introducción al Análisis de Fourier, Cinvestav, Unidad Tamaulipas.

Foro Coches, (2014), Aditivo en caja de cambios, tomado de: <https://forocoches.com/foro/showthread.php?t=3906681>

Hernández Michel, S. Z., (2018), “Análisis de vibraciones para detección de fallas en aerogeneradores de baja potencia.

Hwei, P., (1987), Análisis de Fourier, Addison-Wesley Iberoamericana, Delaware, USA.

INEGI, (2019), Georreferenciación de accidentes de tránsito de accidentes de tránsito en zonas urbanas.

Liew, K. y Q. Wang, (1998), "Application of wavelet theory for crack identification in structures", Journal of Engineering Mechanics, vol. 124, núm. 2, pp. 152-157.

Loaiza Sánchez, W. F., (2021), Detección y diagnóstico de fallos de caja de engranajes rectos utilizando un algoritmo de clasificación basado en similaridad difusa aplicado en señales de vibración.

Mohammed S., (2012), Fourier Transform Applications. Janeza Trdine, Rijeka, Croatia: Vana Persen.

Morelos Gómez, A., (2020), Detección, localización y cuantificación de daños en estructuras civiles metálicas midiendo vibraciones.

Nissan Financial Services, (2023), Velocidad recomendada para cada cambio de marchas, tomado de: <https://nissanfinanciacion.es/blog/velocidad-recomendada-para-cada-cambio-de-marchas/>.

Pacheco Córdova, E., Sánchez Loja, R. V., Cabrera, D., Cerrada, M., (2019), Adquisición de señales de vibración y emisión acústica para el diagnóstico de severidad de fallos en maquinaria rotativa.

Plaza, D., (2020), ¿Cómo funciona la caja de cambios?, tomado de: <https://www.motor.es/noticias/como-funciona-caja-de-cambios-202065744.html>

Rodríguez, A., (2023), 5 autos con transmisión manual versión 2023 que puedes conseguir en EE.UU., tomado de: <https://siempreauto.com/5-autos-con-transmision-manual-version-2023-que-puedes-conseguir-en-ee-uu/>

Saucedo Dorantes, J.J., (2014), Análisis del desgaste en engranes aplicando el método de elementos finitos.

Saucedo Dorantes, J.J., Delgado Prieto, M., Ortega Redondo, J.A., Osornio Rios, R.A., Romero Troncoso, R.J., (2016), Vibration Analysis as a Diagnosis Tool for Health Monitoring of Industrial Machines.

Trinidad Torres, F. A., (2017), Transformada de Fourier y su aplicación en procesamiento digital de imágenes.

Redacción Aceromafe, (2022), IMPORTANCIA Y APLICACIONES DE LOS ENGRANAJES PARA LAS INDUSTRIAS, Aceromafe, tomado de: <https://www.aceromafe.com/aplicaciones-de-los-engranajes/>

Rodríguez, A., (2022), Cómo funciona la caja manual de un auto, Siempre Auto.

Rotoplasmx, (2019), Tipos de Bombas hidráulicas Rotoplas, Rotoplas, tomado de: <https://rotoplas.com.mx/tipos-de-bombas-hidraulicas-rotoplas/>