



Universidad Autónoma de Querétaro

Facultad de Ingeniería

DISEÑO DE UN SISTEMA MULTISENSORIAL PARA EL MONITOREO DE CONDICIONES DE CORTE EN CENTROS DE MAQUINADO CNC

TESIS COLECTIVA

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de
Ingeniero en Automatización con línea terminal en Mecatrónica

Presentan:

Juan Josue Martínez Gómez
Oscar Alejandro Pérez Huelga
Héctor Ricardo Rodríguez Andrade

Dirigido por:

Juan Carlos Antonio Jáuregui Correa

SINODALES

Juan Carlos Antonio Jáuregui Correa

Presidente

Edgar Alejandro Rivas Araiza

Secretario

Fortino Mendoza Mondragón

Vocal

Miguel Ángel Pérez Prado

Suplente

Firma

Firma

Firma

Firma

Centro Universitario
Querétaro, QRO
México.
Agosto 2021



Dirección General de Bibliotecas y Servicios Digitales
de Información



Diseño de un Sistema Multisensorial para el
Monitoreo de Condiciones de Corte en Centros de
Maquinado CNC

por

Juan Josue Martínez Gómez
Oscar Alejandro Pérez Huelga
Héctor Ricardo Rodríguez Andrade

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-220556

*A mis amigos por su apoyo en cada momento,
a mi familia por motivarme siempre,
y a mis padres, por brindarme su fe y cariño cada día.*

J. Josue Martínez Gómez

*A mis amigos por su persistencia,
a mi familia por su aliento
y, en especial, a mi hermana por su ejemplo
y a mis padres por su apoyo incondicional.*

Oscar A. P. Huelga

*A mis amigos por acompañarme en este proyecto,
a mi familia por estar ahí cuando los necesitaba,
y en especial a mis hermanos Alex, Liz y Checo,
y a mis padres, Luz y Sergio, por confiar en cada una de mis
decisiones.*

Héctor R. Rodríguez Andrade

Agradecimientos

Queremos agradecer primeramente al Dr. Juan Carlos Jáuregui por su ayuda y orientación para el desarrollo de este proyecto y los venideros. También queremos extender un agradecimiento a nuestros sinodales, los doctores Edgar Rivas, Fortino Mondragón y Miguel Prado por su apoyo; a la Universidad Autónoma de Querétaro por brindar financiamiento en dos ocasiones a través del Fondo de Proyectos Especiales de Rectoría (FOPER), a la Facultad de Ingeniería por los espacios y herramientas para trabajar, a la Oficina de Transferencia Tecnológica de la Dirección de Posgrado e Investigación y, finalmente, al profesorado de la facultad en general, que en la docencia aportaron al conocimiento para llevar a cabo este proyecto. Agradecemos su apoyo para la culminación de esta obra.

Resumen

En este trabajo se presenta el desarrollo integral de un dispositivo de medición de fuerza en los dos ejes ortogonales del plano horizontal. El sistema, basado en celdas de carga, se encuentra enfocado en aplicaciones para estimación del desgaste de las herramientas de corte en centros de maquinado con Control Numérico por Computadora (CNC). El desarrollo comprende un sistema mecatrónico, con una etapa mecánica y una electrónica, que va desde la concepción de la idea, definición de los subsistemas, selección de componentes, pruebas de concepto e ingeniería de detalle; todo esto, bajo los lineamientos de los Niveles de Maduración Tecnológica propuestos por la NASA. Posteriormente, se realizó una serie de experimentos con la intención de evaluar el desempeño de los subsistemas del dispositivo, tanto de forma individual como en conjunto, siendo uno de los propósitos más importantes el de poder comprobar el grado de interferencia cruzada entre los ejes de medición. Los resultados indican que el sistema posee el potencial para satisfacer la aplicación destino, pero aún es necesario realizar pruebas más rigurosas y ciertas modificaciones al sistema.

Palabras clave: manufactura, maquinado, Control Numérico por Computadora (CNC), herramientas de corte, desgaste, celdas de carga, fuerzas de reacción.

Abstract

This work presents the integral development of a two-axis force measuring device for the horizontal plane. The system, based on load cells, is focused on CNC cutting tool wear applications. The development comprises a mechatronical system, including a mechanical and an electronic stage, which extends from the conception of the idea, subsystem definition, component selection, proof of concept and detailed engineering; all of this, under the guidelines of NASA's Technology Readiness Levels (TRL). Finally, a series of experiments were executed with the intention of evaluating the performance of the device, from individual subsystems to the device as a whole, with one of the most important being verifying the degree of crosstalk between the measurement axes. The results demonstrate the system's potential for its use on the intended application, but more rigorous testing and certain modifications to the system are needed.

Keywords: manufacturing, machining, Computer Numerical Control (CNC), cutting tools, wear, load cells, reaction forces.

Índice general

Agradecimientos	V
Resumen	VII
Abstract	IX
Índice general	X
Lista de figuras	XII
Lista de tablas	XIV
1. Introducción	1
1.1. Contexto histórico	1
1.2. El proceso de maquinado	3
1.3. La industria metalmeccánica en la economía mexicana	4
1.4. Justificación	5
1.5. Problemática	7
1.6. Hipótesis	9
1.7. Objetivo	9
1.7.1. Objetivos específicos	9
2. Revisión de literatura	10
2.1. Medición de desgaste en herramientas de corte	10
2.1.1. Métodos de medición directa	10
2.1.2. Métodos de medición indirecta	12
2.2. Investigaciones en la Universidad Autónoma de Querétaro	15
3. Fundamentación Teórica	17
3.1. Sistema ideal de estimación de desgaste mediante fuerza	26
3.1.1. Respuesta en la frecuencia:	26
3.1.2. Tolerancia a las variaciones de temperatura:	28
3.2. Diseño del sistema de estimación de desgaste	29

4. Metodología	33
4.1. Niveles de Madurez Tecnológica	33
4.2. Enfoque de la investigación	34
4.3. Diseño conceptual del dispositivo	34
4.4. Diseño del sistema	35
4.4.1. Principio de medición	36
4.5. Etapas del sistema	36
4.5.1. Etapa mecánica	36
4.5.2. Instrumentación – Sensores de fuerza	41
4.5.3. Instrumentación – Acondicionamiento	44
4.5.4. Diseño de las tarjetas electrónicas	48
4.6. Diseño de pruebas	50
4.6.1. Tiempo de respuesta de las celdas de carga	50
4.6.2. Prueba con carga en desbalanceo	52
4.6.3. Prueba con dispositivo de vibración	54
4.6.4. Estimación de interferencia cruzada (<i>Crosstalk</i>)	56
5. Resultados y Discusión	58
5.1. Diseño del dispositivo	58
5.1.1. Etapas del sistema de medición	58
5.1.2. Tarjetas electrónicas	61
5.2. Pruebas y experimentos	63
5.2.1. Tiempo de respuesta de las celdas de carga	63
5.2.2. Prueba con carga en desbalanceo	67
5.2.3. Prueba con dispositivo de vibración	69
5.2.4. Prueba de estimación de interferencia cruzada	79
5.2.5. Discusión	81
5.3. Publicaciones	82
5.3.1. Fondo de Poyectos Especiales de Rectoría (FOPER)	82
5.3.2. Solicitud de patente	83
5.4. Trabajo futuro	83
6. Conclusiones	85
Referencias	92
Apéndice A. Scripts creados	93
A.1. Espectro de frecuencia	94
A.2. Diagrama de Bode	95
A.3. Tiempo de respuesta	96
A.4. Estimación de interferencia cruzada (<i>Crosstalk</i>)	102
Apéndice B. Calibración de Sensores	105
Apéndice C. Información detallada	111
C.1. Barrido de frecuencias	111

Índice de figuras

2.1. Dinamómetro para medición de fuerzas de corte	14
3.1. Procesos de manufactura por remoción de material.	18
3.2. Principales procesos de maquinado convencional.	19
3.3. Diagrama de relaciones entre las fuerzas de corte	24
3.4. Diagrama de Bode de un sistema ideal.	28
4.1. Diagrama a bloques del sistema de estimación de desgaste.	35
4.2. Versiones conceptuales de la etapa mecánica	37
4.3. Versiones manufacturadas de la etapa mecánica	38
4.4. Modelo explosionado de la etapa mecánica	39
4.5. Modelo ensamblado de la etapa mecánica.	40
4.6. Ejemplos de uso de tolerancias dimensionales	41
4.7. Ejemplos de uso de tolerancias geométricas	42
4.8. Celda de carga de botón Omega LM304-5K	42
4.9. Modelo explosionado de la etapa mecánica	43
4.10. Diagrama simplificada de la etapa electrónica.	45
4.11. Tarjeta de instrumentación <i>INA-4LC-8NTC</i>	46
4.12. Circuito RC, tomado como filtro pasa-bajas pasivo.	47
4.13. Tarjeta de instrumentación <i>INA-4LC-8NTC</i>	48
4.14. Versiones de la tarjeta electrónica de distribución.	49
4.15. Diagrama de prueba de impacto	51
4.16. Configuración de la prueba de desbalanceo	52
4.17. Prueba de desbalanceo con vibrómetro láser Polytec PDV 100	54
4.18. Plano de fabricación de la pieza de acoplamiento para prueba de vibración	55
4.19. Configuración de la prueba de vibración	56
4.20. Diagrama de la prueba de estimación de la interferencia cruzada.	57
5.1. Proceso de manufactura de la etapa mecánica versión 3.	59
5.2. Versión 3 del sistema mecánico.	59
5.3. Adición de mejoras a la etapa mecánica	60
5.4. Versión 3 del sistema mecánico.	60
5.5. Fotografía de la tarjeta de instrumentación <i>INA-4LC-8NTC</i>	61
5.6. Fotografías de las tarjetas de distribución.	61
5.7. Fotografía de las tarjetas electrónicas ensambladas.	62

5.8. Tiempo de respuesta de celda #1.	63
5.9. Gráfica de dispersión de celda #1	64
5.10. Gráfica de dispersión de celda #2	64
5.11. Gráfica de dispersión de celda #3	65
5.12. Gráfica de dispersión de celda #4	65
5.13. Espectros de frecuencia obtenidos para galga y vibrómetro láser.	67
5.14. Espectros de frecuencia obtenidos para los acelerómetros.	67
5.15. Espectros de frecuencia obtenidos para celdas de carga.	68
5.16. Prueba con dispositivo de vibración. Eje Y.	69
5.17. Señales obtenidas tras un excitación en el eje X, $f = 315$ Hz.	70
5.18. Espectros de frecuencias obtenidos en el eje X. Excitación eje X.	71
5.19. Espectros de frecuencias obtenidos en el eje Y. Excitación eje X.	72
5.20. Digramas de Bode, fuerza de excitación en el eje X.	73
5.21. Señales obtenidas tras una excitación en el eje Y, $f = 290$ Hz.	74
5.22. Espectros de frecuencia obtenidos en el eje X. Excitación eje Y.	75
5.23. Espectros de frecuencia obtenidos en el eje Y. Excitación eje Y.	76
5.24. Digramas de Bode, fuerza de excitación en el eje Y.	77
5.25. Disminución de la corriente suministrada al barril con frecuencias altas.	78
5.26. Prueba de impacto sobre el eje X	79
5.27. Prueba de impacto sobre el eje Y	79
5.28. Preparación para FOPER 2018.	82
5.29. Presentación del proyecto en FOPER 2019.	82

Índice de cuadros

2.1. Comparación de métodos de medición directa.	12
2.2. Comparación de métodos de medición indirecta.	15
3.1. Valores típicos para n y C en la ecuación de Taylor.	22
5.1. Tiempo de respuesta de las celdas de carga.	66
5.2. Señales de salida de los sensores.	80
5.3. <i>Crosstalk Performance</i> .	80
C.1. Frecuencias que conforman el barrido.	111

Introducción

El desarrollo de tecnologías para la producción de bienes ha logrado mejorar la calidad de éstos y, a la vez, ha reducido el consumo de recursos para crearlos. Debido a su impacto económico y vasta implementación en la industria manufacturera, los procesos de maquinado presentan un área de oportunidad para la creación de nuevas tecnologías, que finalmente contribuye al crecimiento de las economías emergentes.

1.1. Contexto histórico

Desde la prehistoria, el ser humano ha buscado diferentes medios para cubrir sus necesidades. Desde supervivencia hasta comodidad, ha sido preciso mejorar la tecnología disponible para lograrlo, puesto que los recursos son limitados y las necesidades aumentan con el paso del tiempo. Esto ha repercutido en una mayor complejidad en los procesos de producción de bienes, dada la demanda de productos cada vez más especializados. La **manufactura** es una actividad que comenzó hace miles de años, en los albores de la humanidad, con el fin de satisfacer estas necesidades, pues posibilita la creación y desarrollo de la tecnología [1].

La fabricación de armas y herramientas de piedra fue esencial para la supervivencia del humano primitivo. Hacia el año 6,000 a.C., la piedra fue sustituida por la cerámica y el metal, facilitando la agricultura y otras actividades esenciales. Tiempo después, en la Antigua Roma, existían ya métodos para la manufactura de productos de vidrio de manera masiva, así como la división de labores en la minería, metalurgia y la industria textil.

Hasta ahora, estas actividades se realizaban mediante trabajo generado por la fuerza humana o por animales de tiro, sin embargo, durante la Edad Media, se comenzaron a aprovechar el viento y el agua en movimiento para impulsar máquinas. Más tarde, a finales del siglo XVIII, la máquina de vapor reemplazó efectivamente todas estas, incrementando también la potencia disponible para trabajar, y de esta manera, dando paso a la Primera Revolución Industrial [2].

Durante este periodo se desarrollaron máquinas importantes: la hiladora de varios husillos, el telar mecánico, la línea de ensamblaje, y la considerada primera **máquina-herramienta**, inventada por John Wilkinson hacia 1774. Esta última tenía el nombre de Mandriladora de Wilkinson

[3], [4], y era usada para crear agujeros en cilindros. Esta serie de desarrollos sentó las bases para lo que se conoce actualmente como **maquinado** [5], [6], que se refiere a todas aquellas operaciones de **remoción de material** excedente de una pieza de trabajo, con el fin de obtener un producto [7].

Durante el siglo XVIII, las máquinas eran en general grandes, pesadas y de compleja operación, además de representar un peligro laboral. Esto no cambiaría sino hasta finales del siglo XIX cuando se integraron los motores de corriente eléctrica, simplificando los mecanismos, y reduciendo considerablemente su tamaño, naturalmente diversificando y propiciando su uso, pues ahora los talleres pequeños también podían hacer uso de estas [8].

La tecnología también avanzó en el área de los materiales. El ingeniero estadounidense Friedrich Taylor desarrolló nuevas aleaciones de aceros, con los cuales fue posible generar **herramientas de corte** más duraderas y resistentes, posibilitando la remoción de material a una mayor velocidad. A estas herramientas se les conoció como herramientas de acero rápido. Tiempo después, en Alemania, se crearon herramientas de corte con un material recientemente desarrollado para la industria armamentística: el carburo de tungsteno. Éste poseía capacidades incluso superiores a los aceros rápidos.

A pesar del avance sobre los materiales y las máquina-herramientas, aspectos relacionados con la manufactura del producto como la complejidad, las relaciones de tolerancias o la precisión de los acabados estaban limitados por la habilidad de los operadores de dichas máquinas; era preciso innovar en esta área.

Hacia finales de la década de los cuarenta se integró por primera vez el Control Numérico (CN) a una máquina-herramienta. John T. Parsons y Frank Stulen consiguieron operar una fresadora bajo el control de tarjetas perforadas [1], [5]. Esto trajo consigo una nueva era en la **automatización** de la manufactura [9].

Con la llegada del control numérico, las máquinas-herramienta como los **centros de maquinado** comenzaron a adoptar las nuevas tecnologías que traerían las décadas siguientes. La incorporación de la computadora llegaría en los años setenta, donde se integrarían nuevas formas de control e interfaces para el usuario, dando paso al **Control Numérico por Computadora (CNC)** [10]. Posteriormente, se incorporaron la robótica y el diseño asistido por computadora. Con la adopción de la robótica, procesos como el cambio de herramienta o la colocación de piezas pasaban a ser automatizados, mientras que el uso de software de diseño asistido (CAD) permitiría el diseño de piezas de manera más eficiente.

Actualmente, se han introducido al mercado tecnologías orientadas a la **Industria 4.0**, cuyo objetivo es la interconexión digital de la mayoría de los instrumentos y máquinas en los procesos de producción con el fin de automatizarlos y tener un nuevo nivel de control sobre cada etapa [11], [12]. La automatización de los procesos posibilita la reducción de la interacción por parte del operador, destinando el tiempo a otras actividades y disminuyendo el error humano. Ya no basta con producir más, sino producir de forma eficiente en calidad y cantidad, **optimizando** los recursos de la mejor manera posible [13].

En la actualidad es difícil imaginar la manufactura sin la existencia de maquinado moderno. Se han vuelto parte intrínseca de la industria en casi todos los niveles de desarrollo y producción. Por ejemplo, sería difícil concebir el progreso de la industria aeronáutica, aeroespacial o automotriz sin los avanzados procesos de maquinado empleados en la producción de sus piezas.

1.2. El proceso de maquinado

Como ya fue mencionado, la manufactura posibilita la existencia de la tecnología, con el fin de satisfacer las necesidades de la sociedad [1]. Dada la especialización de estas, se suele requerir de piezas complejas, volviendo necesario el empleo de distintos métodos de producción de piezas para lograrlo. Dentro de la manufactura, el maquinado es considerado uno de los procesos más importantes; destaca su aportación a la Revolución Industrial, donde jugó un papel importante en su desarrollo y en el crecimiento económico, debido al desarrollo de distintas operaciones orientadas a este [1]. El maquinado puede ser dividido en tres grandes categorías: procesos abrasivos, maquinado convencional y maquinado no convencional (a veces llamado no tradicional o avanzado).

Los procesos de abrasión logran excelentes acabados superficiales y dimensiones muy precisas; algunas operaciones de este tipo son el lijado, el esmerilado, el lapeado y el bruñido [2]. Por su parte, el maquinado convencional consta de tres principales operaciones: el **torneado**, el **taladrado** y el **fresado**. Por otro lado, el maquinado no convencional es llevado a cabo por operaciones como el maquinado ultrasónico, el corte con chorro de agua, el micromaquinado, el maquinado termoeléctrico, entre otros [14], [15]. Esta última categoría satisface necesidades mucho más especializadas que el primero, al generar piezas con acabado y ultraprecisión difícilmente alcanzables incluso con características de maquinado CNC [7]. Sin embargo, el maquinado convencional es el más empleado debido a que alcanza una velocidad de remoción de material en general mayor que el otro grupo [15]. Es posible encontrar métodos de maquinado híbrido, haciendo uso de dos o más de estas técnicas avanzadas y convencionales [16].

Las operaciones de maquinado convencional están sujetas a una serie de fenómenos físicos inherentes al proceso de maquinado. Algunos de estos parámetros son las **fuerzas de corte**, el **estrés en la herramienta**, las **vibraciones** y la **temperatura**. Una manera de obtener información relacionada con estos parámetros es a través de las **condiciones de corte**, dadas por la velocidad, ángulo y tamaño de corte, además de la geometría y propiedades físicas de la herramienta y la materia prima [1], [17], [18]. Por otro lado, es posible medir algunas magnitudes de éstos fenómenos. Es de importancia que el usuario cuente con esta información puesto que si el proceso no se encuentra bajo parámetros adecuados, la herramienta de corte puede fallar, causando problemas en las máquinas y errores de fabricación en las piezas, que a su vez se traducen en pérdidas de materia prima, recursos económicos y tiempo. Las herramientas de corte pueden perder filo a través del **desgaste gradual**, o fallar catastróficamente debido a una **falla por temperatura**, o a una **falla por fractura**.

En un ambiente real de producción suele ser inconveniente usar una herramienta hasta que ocurra alguna de estas fallas [1], se define entonces la vida útil de la herramienta de corte como el tiempo en el cual se puede utilizar antes de alcanzar cierto nivel de desgaste establecido. La

duración de este periodo de tiempo normalmente es expresada en minutos; por norma general, las herramientas duran apenas decenas de éstos [2]. Algunos factores influyentes en la vida útil de una herramienta son los materiales de su composición, la materia prima, la geometría de la herramienta, la velocidad de corte, la velocidad de avance, la temperatura de corte y la fuerza de corte [19].

La automatización de los procesos actuales requiere de medios por los cuales obtener esta valiosa información sobre los parámetros del proceso y, de esta manera, calcular la vida de la herramienta a través de métodos matemáticos, por ejemplo, con la ecuación de Taylor, evitándose así los errores y las pérdidas descritas anteriormente.

La estimación objetiva de la vida útil del cortador trae consigo sus propios problemas. Algunos métodos interrumpen del proceso de maquinado para retirar la herramienta y evaluarla, lo que resulta contraproducente en un escenarios reales; aunado a esto, esta evaluación no es una medición en tiempo real. Por otro lado, la medición en línea suele resultar en el entorpecimiento del proceso, además de errores en la obtención de mediciones debido a ruido electromagnético, variación de temperaturas, **interferencia cruzada textit(crosstalk)** y otros factores [20], [21], [22]. La naturaleza misma del proceso requiere de un sistema robusto para la obtención de esta información.

Los factores pueden ser medidos directamente o calculados a partir de magnitudes físicas. Para ello, es necesario hacer uso de diversos sensores, que bien pueden realizar una medición directa de la magnitud, entrando en contacto con el proceso, o a través de una medición indirecta, sin interactuar físicamente con él. Por ejemplo, las fuerzas de reacción en el proceso de maquinado pueden ser medidas directamente a través de galgas extensiométricas, sensores piezoeléctricos [23], [24] o **celdas de carga**; u obtenidas de manera indirecta mediante sensores de desplazamiento en el husillo o la herramienta de corte, monitoreo de corriente eléctrica, sensores de emisión acústica o de vibración.

1.3. La industria metalmecánica en la economía mexicana

La industria metalmecánica representa un porcentaje significativo en la economía de México. Según datos del Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas (DENUE) [25], al segundo trimestre del 2021 existen en todo México 77, 930 establecimientos cuya actividad está relacionadas con la fabricación de productos metálicos básicos, maquinaria y equipo. Desde 2017 y hasta 2020, este sector generó cerca de 2.3% del PIB anual, teniendo un valor de producción de más de 500 mil millones de pesos anualmente [26].

La participación de esta industria en Querétaro es de especial importancia. Para el año 2019, el valor de la producción manufacturera en el Estado de Querétaro incrementó en un 2.4% respecto del año anterior, generando 348 mil millones de pesos [27], [28]. La fabricación de productos metálicos y la fabricación de maquinaria y equipo tuvieron una participación del 3.9% y 4.3% de este total, respectivamente, lo que representa un valor en conjunto de cerca de 28, 678 millones de pesos corrientes.

Las operaciones de maquinados no sólo están presente en las industrias dedicadas a los productos metálicos. Es posible encontrar esta actividad en otras áreas como la industria automotriz, la

aeronáutica, la naval y la armamentística, lo que amplía el campo de oportunidad para el desarrollo de tecnologías para la optimización de este proceso.

En conclusión, el monitoreo del desgaste producido en la herramienta de corte es un método utilizado para optimizar la operación de maquinado. A menudo, calcular el desgaste es una actividad llevada a cabo por el operador, debido a que los métodos de análisis matemático no son prácticos en escenarios reales de producción, tornándose en una evaluación subjetiva que depende completamente de la experiencia y la habilidad [1], [2]. Se presenta entonces un problema técnico con un campo de aplicación amplio y valioso, en búsqueda de métodos y técnicas para la evaluación objetiva del desgaste de la herramienta de corte.

1.4. Justificación

La industria manufacturera se encuentra en constante evolución, siendo el desarrollo tecnológico parte fundamental de ello. En consecuencia, los avances tecnológicos han sido cruciales para la mejora de la calidad de los productos, la afinación de los procesos de producción, y en general, para una creciente eficiencia y optimización económica, siempre buscándose que esta última no afecte negativamente a las demás.

Dentro de la industria de la manufactura, la generación de productos maquinados ocupa un lugar importante, aportando de manera significativa a la economía. Por ejemplo, en países industrializados hacia el año 2014, el maquinado generó más del 20 % del valor de todos los productos manufacturados [29], por lo tanto, reducir los costos de producción y operativos de esta actividad impactaría de manera positiva a países como México, donde es fundamental en el esquema económico.

La industria manufacturera es considerada uno de los sectores económicos más grandes de México. Es posible constatar esto dado que, tanto en 2019 como en 2020, contribuyó al Producto Interno Bruto (PIB) anual con 4.23 y 3.97 billones de pesos, respectivamente, lo que representa más del 17 % del total en ambos años [26]. Dentro de este sector, la industria metalmecánica aportó una porcentaje importante: del total del PIB anual 2020, las industrias metálicas básicas aportaron 1.0 %, la fabricación de productos metálicos representó el 0.6 %, y la fabricación de maquinaria y equipo generó cerca del 0.7 %. Se habla de una contribución de 527, 830 millones de pesos actuales durante este periodo.

La importancia del sector metalmecánico es de especial importancia en el Estado de Querétaro, pues en él existe una gran cantidad de establecimientos dedicados a la industria metalmecánica. De acuerdo con el Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas (DENUE) del INEGI [25], en el estado existen 8, 110 unidades económicas dedicadas a la industria de la manufactura, de las cuales, 1, 636 están relacionadas con las actividades de fabricación tanto productos metálicos básicos como de maquinaria y equipo. Éstas generaron un valor en conjunto de cerca de 28, 678 millones de pesos corrientes en 2019 [28]. Además, la manufactura de productos maquinados no sólo está presente en las actividades de elaboración de productos metálicos básicos, ésta se encuentra también en otras áreas económicas como la industria automotriz, la aeroespacial y la naval, donde se requieren de elementos maquinados especializados.

Es posible observar que los procesos de manufactura de metales tienen una gran presencia en el estado y el país, representando un área de oportunidad para el desarrollo e implementación de métodos de optimización de recursos y mejoras que ayuden a reducir los costos operativos y de producción de esta actividad. Específicamente, en el maquinado, una manera de hacerlo es a través de la preservación del capital destinado a la máquina, el herramental y el producto final.

La economía en un proceso como el maquinado depende de diversos factores como el tiempo de operación, el material de trabajo, el tipo de herramienta y el desgaste de esta; por lo que si se quiere mejorar la eficiencia económica del proceso se es necesario optimizar los recursos destinados en los factores mencionados, también llamados gastos operativos. El desgaste de la herramienta de corte es una de las mayores preocupaciones durante un proceso de maquinados: la herramienta es sometida a presiones, temperaturas altas y a constantes cargas de impacto. Por lo tanto, la economía del proceso es controlada en gran medida por su vida útil [2].

En la mayoría de las operaciones de maquinado, los operadores son quienes realizan el cambio de una herramienta desgastada, basándose en su experiencia. De esta manera, el desgaste es rara vez medido de forma cuantitativa y, por lo tanto, cabe la posibilidad de no utilizar la herramienta correctamente, descartando una posiblemente aún operativa, o en el otro extremo, utilizándola más allá de las condiciones óptimas, disminuyendo la calidad de la pieza de trabajo o estropeándola completamente.

Como ya se ha abordado en la Sección 2, la posibilidad de monitorear las fuerzas de corte en procesos de maquinado representa una oportunidad para obtener información objetiva de gran valor, orientada a describir el desempeño, tanto de las herramientas como de los procesos empleados. Esto es de particular interés para la optimización de recursos: al conocerse el estado de las herramientas de corte se puede gestionar el gasto y maximizar su vida útil.

El propósito de monitorear el estado de las herramientas de corte no sólo es la optimización de los recursos económicos, sino también la mejora en la calidad de los productos maquinados: una herramienta de corte en óptimas condiciones de operación realizará mejor su trabajo. En industrias como la aeroespacial, naval y automotriz, es importante el cumplimiento de elevados estándares de calidad, debido a que estos sectores cuentan con altos estándares en materia de seguridad, confiabilidad y cumplimiento de normativas que garanticen el óptimo desempeño de sus productos.

Las altas expectativas de la industria manufacturera requieren también de una producción ininterrumpida, es por esto que la medición de las fuerzas de corte es preferible respecto a métodos de medición directa, debido a que la mayoría de esos requieren que el proceso sea detenido completamente para evaluar la herramienta. Incluso si los métodos directos pudiesen implementarse en línea con el proceso, aún serían susceptibles a las condiciones físicas como la falta de visibilidad o las vibraciones de la herramienta. Esto pueden variar o entorpecer las mediciones, convirtiéndose en fuentes de incertidumbre. Con la medición de fuerza, en cambio, es posible realizar monitoreo en línea con el proceso, además de que factores como la baja visibilidad o el ruido acústico no la afectan.

La industria constantemente requiere de la integración de nuevas tecnologías, es parte de su evolución y mejora continua. Actualmente existe una tendencia hacia tecnologías de intercomunicación y el manejo de grandes cantidades de datos, tendencia denominada Industria 4.0. La industria metalmeccánica es parte de este movimiento, en el cual se apuesta al fácil acceso a los datos y a su procesamiento para la optimización de los procesos [13]. El presente proyecto tiene la posibilidad de una integración a este ámbito. Mediante el monitoreo remoto de las componentes de fuerzas se puede obtener información relevante de la máquina-herramienta y su elemento de corte, que posteriormente conformarían una base de datos. Con esto, se podría predecir el comportamiento de la máquina en tiempo real y a lo largo de un periodo de tiempo.

1.5. Problemática

En la actualidad, existen diversos protocolos y dispositivos para estimar el desgaste de una herramienta de corte, sin embargo, éstos no siempre son del todo prácticos para su ejecución durante el proceso de maquinado. En la mayoría de los casos el operador es quien decide si la herramienta se encuentra desgastada o no. Normalmente se emplean métodos empíricos, muchas veces propios, para evaluar el estado de la herramienta. Esto trae consigo varias implicaciones a tomar en cuenta, siendo la principal la falta de una cuantificación exacta del desgaste de la herramienta, en consecuencia, comprometiendo la calidad de las piezas fabricadas. La falta de cuantificación del desgaste no permite el completo aprovechamiento de las herramientas, lo que acarrea su prematuro desecho.

A fin de evitar los efectos negativos de la medición empírica del desgaste, existen diversos dispositivos y métodos de medición que no dependen de la simple observación humana. Existen métodos de medición a través de elementos ópticos como microscopios o sensores láser. Generalmente, este tipo de dispositivos son capaces de medir el desgaste de forma directa y con la ventaja de analizarlo de forma cuantitativa y cualitativa. A pesar de las bondades de estos métodos, existen diversos inconvenientes con su implementación. Uno de ellos es que el proceso debe interrumpirse para efectuar el diagnóstico, es decir, no es posible realizar mediciones del desgaste en línea con el proceso. Es necesario terminar la pieza o detener el corte en algún punto para realizar la medición. En la industria, el tiempo para realizar estos diagnósticos se ve reflejado en pérdida de recursos.

Se han desarrollado dispositivos que resuelven esta última problemática a través del monitoreo de una o varias variables físicas relacionadas con el proceso. Estas magnitudes físicas pueden estar relacionadas con el desgaste de la herramienta de corte de una o varias formas. Por ejemplo, la corriente eléctrica es un indicio importante del esfuerzo que hacen los motores. Una herramienta desgastada genera un mayor esfuerzo de corte y, por consecuencia, será necesario introducir más corriente a los actuadores, de manera proporcional.

Un método de particular interés es la medición de la fuerza aplicada por la herramienta de corte. Las fuerzas pueden ser estimadas en línea con el proceso y son poco susceptibles a otras magnitudes físicas como el ruido acústico o la temperatura. Aunado a esto, es posible detectar inmediatamente eventos como la ruptura o falla de una herramienta.

Actualmente existen métodos de medición directa de la fuerza aplicada por la herramienta de corte, esto se realiza mediante el uso de dinamómetros ubicados en puntos estratégicos. El problema

que comúnmente se presenta con este tipo de mediciones es la existencia de interdependencia entre la transmisión de las diferentes componentes de fuerza, llamada interferencia cruzada o *crosstalk*. La diferenciación de las componentes de fuerzas es muy importante, pues en caso de existir una influencia considerable entre las mismas, se podría ver comprometida la orientación y sentido del vector de la fuerza resultante que es aplicada a la herramienta.

A pesar de existir dispositivos en el mercado que resuelven estas problemáticas efectivamente, resultan ser considerablemente costosos, por lo que su distribución está limitada al sector que puede pagar por todos los servicios que conlleva el uso de estos dispositivos, incluyendo el instrumento de medición, el dispositivo de adquisición y el de procesamiento. Para una amplia implementación de este tipo de tecnologías, será necesario desarrollar dispositivos más accesibles económicamente, permitiendo a la mayoría de las entidades dedicadas a este rubro acceder a la tecnología. Lo ideal es producir con una mejor calidad y a un mejor precio a través de la optimización de los recursos.

La implementación de alguna alternativa que pueda responder a los inconvenientes anteriormente descritos puede afrontar diversos problemas técnicos. A continuación, se presentan una serie de requerimientos que el sistema en cuestión deberá cumplir para sobrepasar dichas problemáticas.

El dispositivo debe ser capaz de medir las fuerzas de reacción que actúan en la herramienta y discernir entre cada una de las componentes de las fuerzas, de esta manera evitando la superposición de las señales. Esto es particularmente importante para obtener la dirección y la magnitud de la fuerza resultante sobre la herramienta. El propósito es evitar el efecto de *crosstalk* entre los sensores de una forma eficiente.

El sistema electrónico de debe ser suficientemente robusto para evitar el ruido electrostático en tanto sea posible. Las condiciones a las que se someterá el dispositivo son particularmente complicadas debido a las características propias del proceso de corte. Dentro de un centro de maquinado existen vibraciones y temperaturas altas, sin mencionar las diferentes partículas que se desprenden del material. El sistema debe afrontar estas condiciones y evitar que influyan en la medición de las variables de fuerza.

La sensibilidad del dispositivo propuesto debe ser suficiente para cumplir con los requerimientos de la aplicación destino. El proceso de maquinado tiene muchos entornos de implementación, en algunos se requiere que los procesos tengan una mayor exactitud que otros; en algunas aplicaciones es incluso indispensable que se tenga un mínimo de error dimensional. El sistema debe ser capaz de poder realizar las mediciones con la exactitud que le exija la aplicación. A su vez, los datos entregados deben ser los suficientes para realizar una optimización de la trayectoria empleada, la velocidad de recepción de datos debe ser suficiente para poder medir todas las señales de fuerzas en tiempo real. De no ser así, se estaría perdiendo información relevante del proceso de corte.

Un dispositivo de medición ideal tendría nula intervención o influencia en la variable bajo monitoreo. Se requiere que el sistema sea capaz de realizar las mediciones de manera no invasiva y en línea con el proceso. Como ya se ha mencionado antes, el tiempo es un recurso valioso en la industria, por lo tanto, el sistema debe entorpecer en lo más mínimo la cronología del proceso. Otra característica es la medición en línea, que responde a la necesidad del registro constante de

las fuerzas, observando las fallas de las herramientas en el instante en el que suceden.

El dispositivo debe ser capaz de adaptarse a las condiciones y exigencias de la Industria 4.0. Es de particular importancia que el dispositivo sea capaz de adaptarse a la proyección futura de los procesos productivos, puesto que estos cambian constantemente. Una de las principales preocupaciones de las empresas que consideran apostar al escenario digital de la Industria 4.0 es la compatibilidad con sus equipos actuales, y cómo estos serán integrados en conjunto sin la necesidad de reemplazarlos [13]. El proceso de maquinado también requiere integrarse a esta tendencia industrial, por lo que la medición de las fuerzas de corte es una excelente fuente de información para este propósito.

1.6. Hipótesis

Es posible desarrollar un sistema de medición *in situ* y no invasivo, cuya sensibilidad y baja interferencia cruzada permitan monitorear los componentes de fuerza ortogonales en el plano horizontal del herramental de corte en centros de maquinado CNC.

1.7. Objetivo

Desarrollar un sistema de medición *in situ* y no invasivo que permita monitorear las componentes de fuerza ortogonales presentes en las herramientas de corte, en el plano horizontal de centros de maquinado CNC, con la mínima generación de interferencia cruzada.

1.7.1. Objetivos específicos

- Realizar el diseño conceptual del sistema de medición de fuerzas.
- Elaborar el diseño de detalle del sistema propuesto, lo cual implica: el plano general, el despiece del conjunto, planos individuales, análisis y cálculos realizados.
- Validar que los sensores propuestos para la medición de fuerza sean adecuados para su uso en las condiciones del entorno especificado.
- Diseñar un prototipo electrónico basado en dispositivos de alto rendimiento que permita adquirir y procesar las señales de las variables físicas obtenidas por el sistema propuesto.
- Llevar a cabo la experimentación necesaria para determinar el grado de interferencia cruzada que pueda existir entre los ejes de medición del sistema.
- Alcanzar un nivel de madurez tecnológica TRL-6, de acuerdo con la metodología establecida por la NASA.

Revisión de literatura

En los procesos de maquinado es importante mantener altos estándares de calidad, por lo que conocer el estado de las herramientas de corte representa una oportunidad para optimizar dichos procesos y garantizar con mayor certeza el cumplimiento de estos estándares. A continuación, se presentan los esfuerzos de investigación que han servido como referencia y han motivado el desarrollo de un sistema de monitoreo del estado de las herramientas de corte. Estos se clasifican en dos grupos de acuerdo a su principio de medición: directa e indirecta. Se analizarán y compararán algunos de los métodos principales de cada principio.

2.1. Medición de desgaste en herramientas de corte

Los métodos y dispositivos capaces de estimar el desgaste de una herramienta de corte son muy variados. Para simplificar su estudio, es posible dividirlos en dos principales grupos. En el primer grupo, el desgaste de la herramienta es medido de forma directa. Para ello, se utilizan principalmente instrumentos ópticos como el láser, las cámaras de video y los sensores fotoeléctricos. Además, dentro de este grupo se puede considerar la inspección del herramienta por parte del operador del centro de maquinado. Por otro lado, el segundo grupo realiza la medición de una magnitud física, que es posible relacionar con el desgaste de la herramienta, es decir, se infiere el desgaste a partir de la medición de una variable física como puede ser la fuerza, la corriente eléctrica o el sonido. Algunas herramientas para lograr esto son las celdas de carga, los amperímetros y el procesamiento de audio, respectivamente.

2.1.1. Métodos de medición directa

Los métodos de medición ópticos predominan dentro del grupo de medición directa. Estos tienen diversos principios de funcionamiento, entre los cuales destacan: dispositivos láser, ultrasonido, fotodiodos, sistemas de fibra óptica y análisis de imágenes con cámara.

Un ejemplo del uso de dispositivos láser es el desarrollado por Y. Wong *et al.* [30]. El sistema consiste en un rayo láser orientado hacia la pieza de trabajo ya finalizada, de tal forma que los rayos reflejados son capturados a través de una cámara digital. La imagen obtenida es procesada y caracterizada usando operaciones como la desviación estándar, la media del patrón de dispersión y

la intensidad de los parámetros ópticos, así como su correlación entre su distribución y la rugosidad de la superficie, encontrando una correlación bastante alta entre estas operaciones y el desgaste.

Existen también métodos que no se basan en elementos ópticos para la medición del desgaste. Un ejemplo es el presentado por Abu-Zahra *et al.* [31], el cual consiste en un sistema compuesto por un portaherramientas con un sensor ultrasónico integrado. Este sensor mide el desgaste gradual en la forma del flanco y la nariz de las herramientas de corte. El análisis se realiza a través de la comparación de herramientas nuevas con desgastadas. Los resultados mostraron una buena correlación entre el desgaste medido y los cambios percibidos a través del sensor ultrasónico.

E. Castillo *et al.* [32] presentan en 2006 un procedimiento para calcular el desgaste de una herramienta de corte a través de un sensor de proximidad de fibra óptica. Mediante este método se plantea la medición directa y en línea del desgaste de la herramienta con una precisión de medición de menos de $1\ \mu\text{m}$. Los resultados experimentales fueron obtenidos sobre una herramienta de 4 filos a 300 RPM.

Dentro de esta clasificación también se encuentran métodos como el desarrollado por D. M. D'Addona [33], donde se emplea el procesamiento de imágenes a través de algoritmos computacionales para poder predecir el desgaste de la herramienta. Por medio de una videocámara se toman diversas imágenes y se analiza el estado de la herramienta a lo largo del proceso de maquinado. La estimación del tiempo de vida útil se realiza a través del algoritmo de redes neuronales llamado red neuronal de retropropagación (BPNN, por sus siglas en inglés), el cual establece una caracterización del desgaste de la herramienta con base en imágenes estandarizadas de la misma y los parámetros de corte establecidos previamente.

A pesar de que muchos de estos métodos presentan resultados efectivos en la identificación del estado de las herramientas de corte, la mayoría dependen de las condiciones en el proceso de maquinado, puesto que la línea de visión de la herramienta es obstruida constantemente por la viruta, el fluido de corte y la operación de corte en sí. Aunado a esto, se requiere de un análisis detallado de la herramienta en reposo. A pesar de que existen este tipo de alternativas, muchas veces el proceso de verificación visual del desgaste es hecho de forma empírica por el operador de la máquina, pues resulta más práctico; sin embargo, es muy dependiente de la experiencia del operador.

En la Tabla 2.1 es posible observar de manera resumida la ventajas y desventajas de cada uno de los métodos de medición mencionados en esta sección.

Tabla 2.1: Comparación de métodos de medición directa.

Método	Ventajas	Desventajas
Láser	Medición directa del desgaste de forma cuantitativa y cualitativa.	Susceptibles a las condiciones físicas del sistema. Interrupción del proceso requerida. Análisis del desgaste fuera del proceso.
Fibra óptica	Medición directa del desgaste de forma cuantitativa y cualitativa. Localización puntal de fallas y desgaste en la herramienta.	Susceptibles a las condiciones físicas del proceso. Requiere montaje de estructura adicional sobre la máquina-herramienta.
Procesamiento digital de imágenes	Medición directa del desgaste de forma cuantitativa y cualitativa. Localización puntal de fallas y desgaste en la herramienta.	Interrupción del proceso requerida. Análisis del desgaste fuera del proceso.
Ultrasonido	Medición en línea del proceso. Medición directa del desgaste de forma cuantitativa y cualitativa.	Susceptibles a las condiciones físicas del proceso. Requiere montaje de estructura adicional sobre la máquina-herramienta.

2.1.2. Métodos de medición indirecta

La medición indirecta del desgaste en herramientas se hace a través del monitoreo de una variable física relacionada con el desgaste. Generalmente, se monitorean las condiciones de corte, puesto que son magnitudes medibles y que se relacionan directamente con el estado del proceso y de la herramienta. Este tipo de dispositivos y métodos de medición son variados, por lo que su implementación depende del tipo de magnitud física a medir.

Existen métodos como el propuesto por S. Kakade *et al.* [34], con el cual, mediante señales sonoras obtenidas en el proceso de maquinado, es posible monitorear el estado de las herramientas y estimar su desgaste. Se analizan parámetros de la señal de emisión acústica como tiempo de bajada, tiempo de subida, frecuencia y tasa de los eventos. En este trabajo se concluye que a través de las señales acústicas es posible identificar con claridad el uso de una herramienta nueva, una herramienta gastada o una fracturada. Sin embargo, con este método no es posible determinar con alta exactitud el grado de desgaste.

Es común que para los métodos indirectos se haga un análisis de la información a través de diversos algoritmos de manejo de datos, como lo son las redes neuronales o machine learning. Ejemplo de esto es el trabajo desarrollado por Zhixiong Li *et al.* [35], donde se monitorean señales de audio con el fin de ser interpretadas a través de algoritmos de *machine learning*. Los datos son usados para desarrollar y validar un modelo predictivo del desgaste de la herramienta de corte.

La temperatura es un factor a considerar dentro de los procesos de maquinado. Esta se eleva a través de la fricción de la herramienta con la pieza de trabajo. Se han desarrollado diversos estudios y metodologías para realizar la medición de la temperatura de la herramienta de corte, con la finalidad de encontrar una relación para la estimación de su desgaste. Esto se debe a que una herramienta de corte desgastada genera mayor fricción con la superficie de trabajo, lo que a su vez aumenta la temperatura en el proceso. M. Davies *et al.* [36] presentaron diversos métodos para la medición de temperatura durante la remoción de material, demostrando como podrían ser aplicados durante el proceso. Kulkarni *et al.* [37] presentaron un método basado en un termopar para determinar las señales térmicas del campo electromagnético. Se observa que altas temperaturas son generadas en la región del borde afilado de la herramienta. La temperatura en el proceso de corte puede ser un buen indicativo del desgaste de una herramienta, sin embargo, la exactitud es cuestionable dada la dependencia en las propiedades térmicas particulares de los diferentes materiales y las dificultades técnicas de medir la temperatura en los puntos críticos de la herramienta [38].

Otra variable física que es posible relacionar con el esfuerzo aplicado a la herramienta y, en consecuencia, con el desgaste de esta, es la corriente eléctrica; en particular, aquella consumida por el motor del husillo de la máquina-herramienta. Se ha observado que la operación con herramientas desgastadas genera un aumento de la corriente requerida por el motor, es decir, el esfuerzo del motor es mayor dada la falta de filo en la herramienta, que presenta mayor fricción entre el flanco del borde filoso de la herramienta y el material. Un ejemplo de este método es el desarrollado por D. Zhang *et al.* [39], donde a través de un sensor de efecto Hall se mide la corriente suministrada al motor del husillo. Se estableció la relación entre torque y corriente para posteriormente, a través de algoritmos, realizar un monitoreo de la forma de la señal de corriente. Con este método fue posible determinar la ruptura de herramientas de manera consistente.

El campo magnético también es una magnitud física con la que se ha intentado relacionar el desgaste de una herramienta. Un ejemplo de esto es el método desarrollado por S. Jetley y A. Gollajesse [40], quienes propusieron la magnetización de insertos en las herramientas de corte, de esta forma podría monitorearse la disminución del flujo del campo magnético conforme el desgaste de la herramienta fuese más evidente. El sistema demostró que es posible predecir de forma precisa el término de vida útil o la fractura de una herramienta en línea con el proceso.

El análisis mediante el monitoreo de las fuerzas de corte de las herramientas es de los métodos más estudiados para estimar el desgaste. Se ha manifestado ampliamente la correlación de las fuerzas presentes en el proceso de maquinado [41], conocidas como fuerzas de corte, y el desgaste de la herramienta. Como fue mencionado anteriormente, una herramienta afilada presenta menor resistencia en el corte de material que una herramienta con desgaste. En el último caso, se requiere un mayor esfuerzo para la remoción, por lo que es apreciable un aumento proporcional de las fuerzas de corte. A lo largo de los años se han desarrollado diferentes mecanismos con el propósito de medir estas fuerzas. A pesar de que el principio de medición es mismo en todos estos, la aplicación e interpretación es diferente. Por ejemplo, investigaciones como la realizada por D. Okumura *et al.* [42] en 2017 presentan el desarrollo un sensor de fuerza de seis ejes. El sensor utilizado para este método está compuesto por elementos sensibles conocidos como galgas extensiométricas, divididas en elementos de flexión de alta y baja rigidez, con un mecanismo de protección ante sobrecargas.

Las galgas extensiométricas de baja rigidez están dedicadas a detectar fuerzas de baja magnitud en un rango de 0 a 100 N y el de alta rigidez, dedicado a la detección de fuerzas más grandes, de 0 a 1,000 N.

Para desarrollar un sistema de monitoreo de fuerzas pueden seguirse diversos criterios, la localización y configuración de los sensores es uno de ellos. Generalmente, los dispositivos se implementan sobre la bancada de los centros de maquinado, a estos se les llama dinamómetros estacionarios; sin embargo, también se han desarrollado sistemas localizados en el área del husillo, llamados dinamómetros rotatorios, tal es el caso del sistema propuesto en 2017 por M. Wan *et al.* [43], el cual consiste en un método de medición indirecta de las fuerzas de corte mediante un sensor de desplazamiento basado en la desviación del husillo. Dicha desviación surge durante el proceso de maquinado, tomando como referencia la línea central de rotación de la herramienta de corte. El principio básico de este método sigue la teoría de flexión de una viga en voladizo.

Es posible encontrar soluciones comerciales que siguen el principio de medición de fuerza para el monitoreo del estado de las herramientas de corte. El grupo Kistler, líder mundial en medición dinámica de magnitudes mecánicas, ha desarrollado dinamómetros estacionarios que permiten el monitoreo de fuerzas de corte en procesos de producción como el fresado y taladrado [44], [45].



Figura 2.1: Dinamómetro para medición de fuerzas de corte, cortesía de Kistler [44]

Los dinamómetros desarrollados por Kistler, como el modelo 9129AA que se muestra en la Figura 2.1, cuentan con 4 sensores piezoeléctricos configurados de tal manera que permiten el monitoreo de los 3 componentes de fuerza en el sistema coordenado cartesiano (x, y, z) , posibilitando la estimación del desgaste a partir del vector de la fuerza en el espacio [44].

En general, los métodos indirectos para estimar el desgaste presentan una ventaja importante sobre los métodos directos: es posible realizar una medición en línea, sin interrumpir el proceso ni evaluar el herramienta previamente. Sin embargo, también son susceptibles a las condiciones del proceso y requieren el montaje de dispositivos adicionales. A continuación, la Tabla 2.2 muestra la comparación entre los distintos métodos indirectos de estimación de desgaste que fueron presentados en esta sección:

Tabla 2.2: Comparación de métodos de medición indirecta.

Método	Ventajas	Desventajas
Corriente eléctrica	Método no invasivo. En línea con el proceso.	Susceptibles a ruido electrostático. Dependencia del estado de actuadores eléctricos (motores).
Emisión acústica	Método no invasivo. En línea con el proceso.	Susceptible a señales y ruidos externos. Medición subjetiva al tipo de material y herramienta.
Flujo magnético	Método no invasivo. Directamente proporcional al desgaste de la herramienta.	Requiere magnetización particular de las herramientas. Susceptible a condiciones del proceso.
Calor	Medición en línea con el proceso	Dificultad para medir la temperatura en el punto de contacto de la herramienta. Susceptible a cambios de temperatura en el proceso.
Fuerza	Método no invasivo. En línea con el proceso. Localización y magnitud del punto de contacto en la herramienta.	Posible interferencia cruzada de los sensores. Área de trabajo limitada al tamaño del dispositivo.

2.2. Investigaciones en la Universidad Autónoma de Querétaro

En lo que respecta a trabajos realizados en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro, es posible mencionar investigaciones y tesis a nivel licenciatura, maestría y doctorado que han abordado el tema de monitoreo del estado de las herramientas de corte desde diferentes perspectivas. Destacan las siguientes:

En 2004, R. Romero [46] desarrolló un método para la detección de desgaste y ruptura de herramientas en el proceso de fresado. El sistema desarrollado realiza procesamiento digital de señales a través de FPGA. Las señales son obtenidas de los servoamplificadores de los motores, se les realiza un filtrado analógico y posteriormente se les aplica un análisis matemático por ondas. Con los datos obtenidos, es posible identificar el porcentaje de desgaste existente en las herramientas.

W. Leal [47] implementó en 2004 un sistema de monitoreo de herramientas de corte en taladros mediante el análisis de la corriente eléctrica en el controlador del husillo y aplicando un algoritmo de asimetría. Este método se basa en una relación no lineal para medir la asimetría entre las formas de onda de las fuerzas de corte producida por la broca, estimando la diferencia de la señal adquirida de un pulso a otro. Durante el taladrado normal, con la broca en buenas condiciones, la diferencia entre los pulsos de la señal es mínima, por lo que la asimetría es cercana a cero. Pero cuando el

desgaste de la broca es mayor, la asimetría crece de forma no lineal a medida que la diferencia entre los pulsos de la señal es cada vez mayor.

M. Trejo [48] implementó en 2010 un sistema de monitoreo, análisis y modelado del desgaste de herramientas bajo condiciones de corte variables en un torno con CNC mediante el uso de un sensor inteligente de bajo costo basado en FPGA. El sensor es capaz de realizar una estimación del desgaste a partir de la medición de la corriente eléctrica y la vibración mecánica durante el proceso de maquinado.

Recientemente, en 2021, G. Díaz [49] exploró una nueva técnica de análisis para determinar el estado de desgaste en herramientas para tornos CNC. La técnica consiste en monitorear el flujo magnético del motor del husillo en el torno, manteniendo los parámetros de corte constantes. A las señales obtenidas se les aplicó la Transformada Wavelet Discreta (TWD, por sus siglas en inglés) para obtener parámetros estadísticos como energía, factor de forma y cresta, desviación estándar, asimetría y valor RMS. Los resultados mostraron que existe una correlación entre la energía de las señales obtenidas y el estado de la herramienta utilizada.

Fundamentación Teórica

Las técnicas de corte de metal han evolucionado notablemente hasta las máquinas herramientas de hoy en día, las cuales son capaces de crear piezas con diseños complejos y ejecutar intrincadas series de operaciones, todo ello bajo control automático. En estos procesos la pieza original circunscribe la forma final deseada, mientras que el material sobrante es arrancado en forma de virutas por una afilada herramienta rotatoria. La pauta en el desarrollo de los procesos de maquinado es marcada por varios factores como los materiales de las herramientas, el desarrollo de nuevos sistemas de control o la integración de nuevas tecnologías como la robótica y sistemas de sensores. Las ventajas de utilizar este tipo de procesos son diversas, algunas de ellas son: una alta precisión en su operación, amplia variedad de formas fabricables y que son procesos relativamente sencillos de automatizar. Por otro lado, como desventajas de los procesos de maquinado podemos encontrar: una alta demanda de energía, tiempos de producción relativamente elevados y encarecimiento de lotes de gran tamaño [50]. Sin embargo, las ventajas son mayores, por lo que los procesos de maquinado por remoción de material son extensamente empleados en los diferentes campos de la industria.

Los procesos de remoción de material engloban una serie de operaciones de formado de material. Estas pueden clasificarse en tres grupos principales: el maquinado convencional, los procesos abrasivos y el maquinado no convencional [1]. A su vez, éstos pueden ser divididos por su principio de operación, como es posible observar en la Figura 3.1, que muestra una simplificación de estas familias de operaciones.

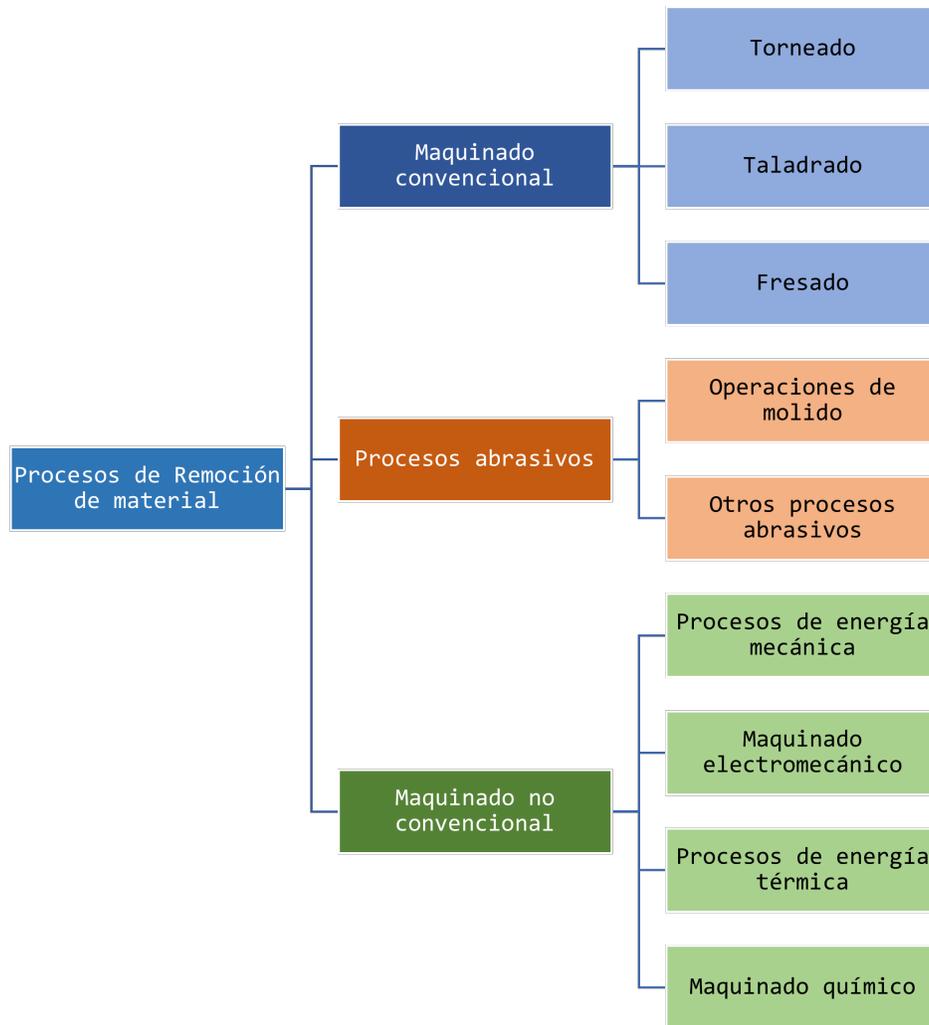


Figura 3.1: Procesos de manufactura por remoción de material.

El maquinado convencional es compuesto por tres procesos u operaciones principales: el taladrado, el torneado, y el fresado [2], [19]. El **taladrado** es una operación de maquinado que se emplea para crear agujeros redondos en una pieza de trabajo. La herramienta de corte es una broca helicoidal de varios filos (Figura 3.2a). En el **torneado**, una herramienta de una sola punta (punto único) remueve material de la superficie de una pieza de trabajo cilíndrica en rotación, como se muestra en la Figura 3.2b. La herramienta avanza linealmente y en una dirección paralela al eje de rotación. El **fresado** es una operación de maquinado muy versátil en la cual se hace pasar una pieza de trabajo frente a una herramienta cilíndrica rotatoria con múltiples filos cortantes (puntos múltiples). El eje de rotación de la herramienta cortante es perpendicular a la dirección de avance. Una operación típica es el fresado frontal, mostrado en la Figura 3.2c [1].

Existen diversas máquinas herramientas que son capaces de realizar estas operaciones, como el taladro, el torno y la fresadora. Estas máquinas pueden tener un control manual donde un operador humano es quien controla el movimiento de los ejes para darle forma y dimensiones a la

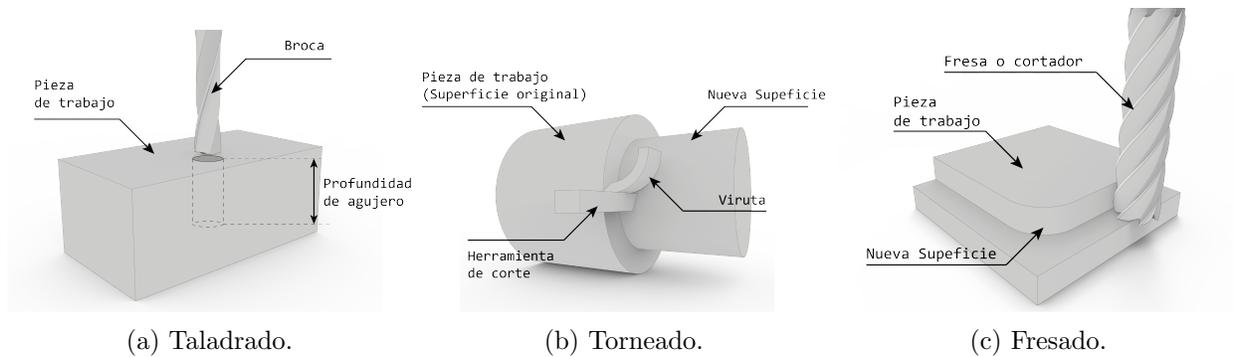


Figura 3.2: Principales procesos de maquinado convencional.

pieza de trabajo, o pueden tener Control Numérico por Computadora (CNC), donde el control de los movimientos de los ejes y el husillo está descrito por una secuencia de instrucciones, las cuáles serán traducidas a movimientos sobre las coordenadas del área del trabajo por el controlador o computador.

Los centros de maquinado son un tipo de máquina-herramienta capaz de realizar las tres operaciones básicas de maquinado de manera automatizada, bajo CNC. La remoción de material es llevada a cabo con mínima intervención humana, permitiendo destinar la atención del operador a otras actividades, disminuyendo el tiempo de operación y la posibilidad de errores humanos.

A pesar del gran avance que ha representado la integración de CNC a los centros de maquinado, éstos no poseen un sistema de retroalimentación que indique cuándo es necesario reemplazar la herramienta de corte, dependiendo únicamente del comando programado por el operador, usualmente establecido cada cierto tiempo de corte o cada cierto número de piezas. Los centros de maquinado no conocen el estado actual del herramental, por lo que es posible que dañen la herramienta si no se planea el proceso adecuadamente.

Es necesario considerar que la herramienta de corte se degrada constantemente durante su uso. Las condiciones de corte influyen en gran medida en esto. Éstas son la velocidad, ángulo y tamaño de corte, además de la geometría y las propiedades físicas de la herramienta y la materia prima. Para realizar una operación de maquinado se requiere del movimiento relativo de la herramienta de corte y la pieza de trabajo a maquinar.

El movimiento principal (primario) es realizado por la herramienta, este se genera con una determinada velocidad de giro, conocida como velocidad de corte. Por otro lado, la herramienta debe moverse lateralmente a través de la mesa de trabajo, este movimiento realizado en plano horizontal se conoce como avance. La dimensión restante, propia de las condiciones de corte, es la profundidad de corte, que es la medida de la penetración de la herramienta en la pieza de trabajo en el eje vertical.

Al ser las condiciones de corte propuestas por el operador, son hasta cierto punto controlables. Es necesario entonces planear la operación de maquinado para que fenómenos como la temperatura, las vibraciones mecánicas, y las fuerzas sobre el material y la herramienta tengan un impacto mínimo sobre la herramienta de corte.

Una parte fundamental en el estudio de las operaciones de maquinado es la herramienta de corte. Su geometría y composición son factores de suma importancia durante el proceso ya que dictan la forma en la que el metal es removido de la pieza de trabajo. Una herramienta de corte tiene uno o más filos cortantes y está compuesta de un material más duro que el material de trabajo. El filo cortante sirve para separar una viruta del material de trabajo. El filo cortante está ligado a dos superficies: la cara inclinada y el flanco de incidencia.

Hay dos tipos básicos de herramientas de corte: herramientas de una sola punta y herramientas de filos múltiples. Una herramienta de una sola punta tiene un único filo cortante y se usa para operaciones como el torneado. Durante la operación con este tipo de herramienta, ésta penetra bajo la superficie original del trabajo. Una herramienta de múltiples filos cortantes tiene más de un borde cortante afilado, generalmente realizando movimiento rotatorio respecto a la pieza de trabajo. El taladrado y fresado emplean este tipo de herramientas [1].

Las herramientas tienen diferentes formas y su composición varía en función del tipo de trabajo que realizará. Esto también afecta a la forma en como se usan y las condiciones a las que pueden estar sometidos. Algunas herramientas resisten mayor estrés, temperatura o velocidad, esto hace que el desgaste se presente de diversas formas y en distintos niveles sobre las herramientas. Cuando los fenómenos y condiciones del proceso crean condiciones de operación que superan las especificaciones de la herramienta, es posible que esta falle por desgaste excesivo o ruptura. Además, la precisión y calidad de la pieza maquinada también podrían resultar afectadas. Existen tres formas posibles de falla en una herramienta de corte:

- **Falla por fractura:** sucede cuando la fuerza de corte en la herramienta es excesiva. Se genera una falla catastrófica que la fractura.
- **Falla por temperatura:** ocurre cuando la temperatura de corte es demasiado alta, provocando deformación plástica en la herramienta y pérdida del filo.
- **Falla por desgaste:** el uso continuo de la herramienta genera desgaste gradual del borde cortante, ocasionando deformación y una falla similar a la de temperatura. La herramienta termina fallando por su propio desgaste natural.

La **vida de una herramienta** se define como la cantidad de tiempo efectivo de corte sin que ocurra alguna de estas fallas. Una forma de cuantificarla es como ya fue descrito, simplemente continuar operando con la herramienta hasta que suceda alguna de éstas. Sin embargo, en producción a menudo resulta inconveniente usar una herramienta hasta este punto, dado el tiempo necesario para volver a afilarla y los problemas que ocasiona en las piezas de trabajo. Es entonces necesario establecer algún criterio para reemplazar la herramienta desgastada por una nueva [1].

En situaciones reales de producción, el operador es usualmente quien define estos criterios. Los más comunes son:

- Inspeccionar a simple vista. El operador detecta desgaste sin herramientas especializadas para observarlo.
- Prueba al tacto del filo cortante. Se buscan irregularidades en el filo, tales como fisuras, redondeo del flanco, cráteres y despostillado.

- Cambio en el sonido emitido por la operación de corte. Se hacen aparentes traqueteos, chillidos, entre otros.
- Cambios en la viruta generada. Se observa más enmarañada y larga.
- Baja integridad de la superficie generada. El acabado empeora hasta un punto indeseado.
- Precisión dimensional disminuida. Las tolerancias dimensionales están fuera de lo requerido.
- Elevación en el consumo de potencia de la máquina. Se encuentra un consumo de potencia más alto de lo usual, debido a un esfuerzo mayor de los motores de la máquina.
- Fuerzas de corte excesivas. Se cuenta con sensores que miden las fuerzas de reacción sobre la herramienta (sin procesamiento de éstas).
- Conteo de piezas trabajadas. Se cambia la herramienta tras un número de piezas generadas.
- Tiempo acumulado de corte. La herramienta es desechada tras alcanzar cierto tiempo de operación [1] [2].

Los criterios se pueden ajustar a la prioridad de la operación. Por ejemplo, en operaciones de desbaste se puede tolerar un acabado superficial de menor calidad y dimensiones menos precisas para lograr una velocidad de remoción mayor, naturalmente utilizando la herramienta hasta un punto más avanzado de su vida.

Es posible notar que la mayoría de los criterios se establecen con base en la experiencia y habilidad del operador, por lo que poseen un carácter subjetivo, susceptible a errores de juicio. En el esfuerzo por tratar la vida de la herramienta con objetividad, se han desarrollado diversos modelos matemáticos para definirla.

En el año de 1907, F. W. Taylor, ingeniero mecánico estadounidense, logró relacionar la velocidad de corte y la vida útil de una herramienta a través de la experimentación, acuñando la Ecuación de Taylor. En la actualidad, es ampliamente utilizada e incluida en estándares internacionales. Se define de la siguiente manera:

$$vT^n = C \quad (3.1)$$

Donde v es la velocidad de corte (mm/min), T es la vida de la herramienta (min) para alcanzar un desgaste en el flanco determinado, n es una constante relativa para el material de la herramienta; y C es una constante del material de trabajo y las condiciones de corte.

Para volver consistentes las unidades de la ecuación, ésta se debe expresar de la siguiente forma:

$$vT^n = C_{T_{ref}} \quad (3.2)$$

Donde T_{ref} es un valor de referencia para C . El valor de T_{ref} es igual a un minuto cuando las unidades que se usan para v y T son (m/min) y (min), respectivamente [1]. Por lo tanto, existen valores de n y C para cada combinación de materiales y condiciones de corte, a encontrar experimentalmente. A continuación, la Tabla 3.1 presenta algunos valores para estas constantes encontrados en la literatura [1], [2], [19]:

Tabla 3.1: Valores típicos para n y C en la ecuación de Taylor.

Material de herramienta	n	C (m/min)	
		Metales sin acero	Aceros suaves
Acero para herramienta simple al carbón	0.1	70	20
Acero de alta velocidad	0.1~1.25	120	70
Carburo cementado	0.2~0.25	900	500
Cermet	0.25		600
Carburo recubierto	0.25		700
Cerámico	0.5~0.7		3000

Con el desarrollo posterior de materiales para herramientas de corte se descubrió que también la velocidad de avance y la profundidad de corte afectan la vida útil de la herramienta, surgiendo así la ecuación de Taylor expandida, dada por la siguiente expresión:

$$v_c T^n f^a d^b = C \quad (3.3)$$

donde d es la profundidad de corte (mm) y f es la velocidad de avance (mm/rev). Los exponentes a y b son determinados experimentalmente para cada combinación de condiciones de corte. Los valores típicos para el acero rápido son $n = 0.17$, $a = 0.77$ y $b = 0.37$.

Las ecuaciones describen únicamente el desgaste de la herramienta de corte al final de la operación de maquinado o en puntos específicos, omitiéndose la mayor parte del estado durante la operación de maquinado. Debido a que no ofrecen información en tiempo real y a que es necesario realizar pruebas experimentales previas para determinar las constantes, su uso en campo es limitado.

Recapitulando, la vida útil de la herramienta depende de los materiales de la pieza de trabajo y de la herramienta en sí, las velocidades de avance y de corte, la profundidad de corte, la presencia de fluido de corte y sus condiciones de uso, el tipo de operación de maquinado y el estado actual de la máquina-herramienta, entre otros parámetros; sin embargo, el juicio del operador y el propósito de la operación tienen un mayor peso sobre la selección del criterio de reemplazo de herramienta en situaciones reales.

Por otro lado, existen métodos para la estimación de la vida útil de la herramienta de corte que podrían proporcionar información relevante del estado de la herramienta en tiempo real. Es posible lograr la estimación realizando una medición de ésta indirectamente, a través de modelos matemáticos o experimentales monitoreando variables como vibraciones, temperatura, medición acústica, medición de potencia, fuerzas de corte, entre otras. Es posible notar que esto concuerda con los criterios mencionados con anterioridad; la diferencia radica en la objetividad de la medición.

El desgaste de una herramienta depende de muchos factores, y el desgaste puede presentarse de varias formas. El desgaste de flanco es el más común bajo condiciones de corte normales. Por lo que se toma a este como el criterio para determinar la vida útil de la herramienta.

En el caso particular de las fuerzas de corte para estimar el desgaste de una herramienta, se han encontrado algunas relaciones importantes. Una de ellas es a través de vibración. La herramienta presenta diversos perfiles de vibración en diferentes etapas de de desgaste. Los patrones de vibración permite entender la tendencia de las fuerzas de corte en las diferentes etapas de la vida de la herramienta. Las fuerzas de corte tienden a tener un aumento estable conforme al desgaste, sin embargo hacia al final de la vida útil de la herramienta, presentan una caída en su magnitud. Un factor a considerar en esto es la deformación plástica que sufre la herramienta hacia el final de su vida, producto del debilitamiento térmico y la carga aplicada, lo que generaría un efecto de amortiguamiento en la vibración y una caída de la magnitud de las fuerzas de corte [51].

Las fuerzas de corte son aquellas que actúan sobre la viruta durante el corte ortogonal de metal y que son ejercidas por la herramienta de corte. Una de las fuerzas principales es la **fuerza de fricción**, la fuerza de fricción se presenta en el contacto entre la herramienta de corte y el material, y representa la resistencia al flujo de la viruta. La **fuerza normal a la fricción** es perpendicular a esta última. Con ambas componentes puede estimarse el coeficiente de fricción entre la herramienta y la viruta del material de trabajo de la siguiente manera:

$$\mu = \frac{F}{N} \quad (3.4)$$

Donde F es la fuerza de fricción, N corresponde a la fuerza perpendicular y μ al coeficiente de fricción.

A través de estas componentes también es posible obtener una fuerza resultante, orientada en un ángulo β , llamado ángulo de fricción.

$$R = \sqrt{F^2 + N^2} \quad (3.5)$$

El ángulo de fricción está dado por:

$$\beta = \arctan \mu \quad (3.6)$$

Además de las fuerzas ya descritas, el proceso imprime otras dos componentes de fuerzas sobre la viruta: la **fuerza cortante** F_s , la cual es la causante de la deformación del material sobre el plano de corte y la **fuerza normal a la cortante** F_n , la cuál es la correspondiente componente ortogonal. Estas magnitudes de fuerza son importantes pues través de la fuerza cortante puede definirse el esfuerzo cortante:

$$\tau = \frac{F_s}{A_s} \quad (3.7)$$

Donde A_s es el área del plano de corte y F_s es la fuerza de cortante.

El esfuerzo cortante es el nivel de esfuerzo requerido por la herramienta para desprender la viruta del material. La suma vectorial de las dos fuerzas anteriormente mencionadas da por resultado una fuerza resultante de la misma magnitud, pero en sentido contrario de la resultante de las componentes de la fuerza de fricción y la fuerza normal a la fricción.

Desgraciadamente, no es posible medir directamente ninguna de las componentes anteriormente descritas. Dependen de diversos factores, incluyendo las condiciones de corte, geometría de la herramienta, velocidad de avance, etc. Sin embargo, es posible estimarlas a través de diversos métodos,

siendo el más común la incorporación de un dinamómetro para medir las fuerzas que actúan sobre la herramienta.

A través de la medición de un par de componentes de fuerzas adicionales es posible obtener la magnitud de las fuerzas de fricción y las fuerzas cortantes. Estas componentes adicionales son: la **fuerza de corte** F_c , la cual va en la misma dirección de la velocidad de corte, y la **fuerza de empuje** F_t , que es perpendicular a la fuerza de corte. [1].

La medición en tiempo real de las distintas magnitudes presenta un primer problema, debido al limitado (o nulo) acceso a la herramienta de corte, obstruida por chorros de aceite de corte, viruta y la materia prima en sí. La Figura 3.3 muestra las diferentes relaciones de las componentes de fuerzas descritas con anterioridad.

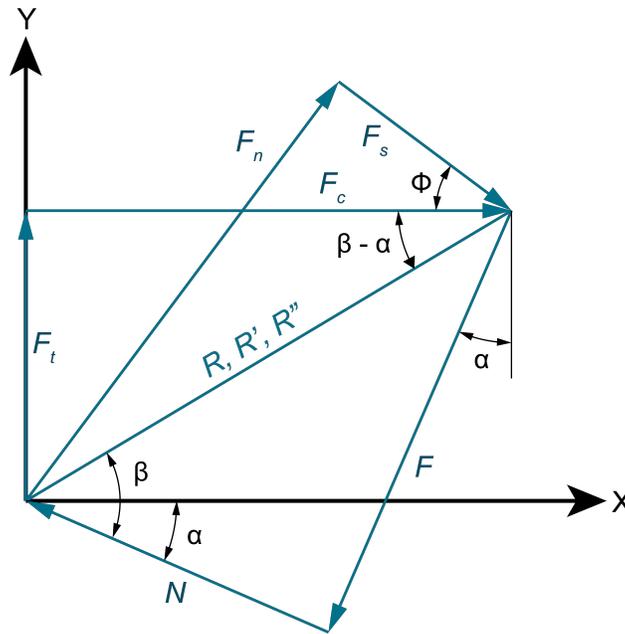


Figura 3.3: Diagrama de relaciones entre las fuerzas de corte

Las fuerzas de fricción y las cortantes son obtenidas a través de las siguientes ecuaciones, que describen la relación con las fuerzas de corte:

$$F = F_c \sin \alpha + F_t \cos \alpha \quad (3.8)$$

$$N = F_c \cos \alpha - F_t \sin \alpha \quad (3.9)$$

$$F_s = F_c \cos \phi - F_t \sin \phi \quad (3.10)$$

$$F_n = F_c \sin \phi + F_t \cos \phi \quad (3.11)$$

Donde:

- F : Fuerza de fricción.
- N : Fuerza normal a la fricción.
- F_s : Fuerza cortante.
- F_n : Fuerza normal a la cortante.
- F_c : Fuerza de corte.
- F_t : Fuerza de empuje.

Es posible relacionar un mayor desgaste con mayor esfuerzo de la máquina para realizar el corte: de manera similar a un sistema en cantiléver, las fuerzas de reacción desvían el centro de rotación del sistema conformado por el husillo y la herramienta de corte. Así, las fuerzas de reacción instantáneas pueden ser calculadas a partir del producto cruz de la rigidez estática y el valor de la deflexión en un punto elegido P, es decir:

$$F_A = K_\delta \times \delta \quad (3.12)$$

Es entonces necesario medir las fuerzas de reacción sobre la herramienta, que son aquellas que aplica el elemento de corte al bloque de materia prima, de misma magnitud, pero en dirección opuesta [1].

En dispositivos de estimación de desgaste con fuerza como principio de medición existe la posibilidad de realizar la medición de manera directa e indirecta, es decir, obteniendo una lectura directamente de la fuerza aplicada, o calculándola a través de alguna otra magnitud física. Algunos de los sensores más utilizados para la medición directa incluyen las galgas extensiométricas y las celdas de carga, [23], [24]. En lo que respecta a métodos de medición indirecta de fuerza, es posible encontrar monitoreo de consumo eléctrico de los motores que impulsan el husillo, la implementación de acelerómetros, medición de la deflexión de la herramienta con sensores ultrasónicos, láser, entre otros [31], [30]. Este enfoque podría ser más susceptible a errores de medición debido a la introducción de pasos adicionales para la obtención de la fuerza.

Dado esto y lo presentado en la Sección 2 es posible observar que los métodos directos de medición poseen ventajas por sobre los métodos indirectos, tomando en cuenta que es necesario corregir las afectaciones originadas por las condiciones extremas del proceso, aunque si el sistema es lo suficientemente robusto, estas alteran mínimamente las mediciones realizadas.

Se definirá entonces un sistema ideal de estimación del desgaste, a través de la medición de fuerza, dada la existencia de ecuaciones que relacionan estas magnitudes con el desgaste, la existencia de una amplia variedad de sensores para la medición de ellas y la posibilidad de aplicación en distintos entornos. Se tomará en cuenta robustez ante condiciones extremas, fiabilidad de medición y aplicabilidad.

3.1. Sistema ideal de estimación de desgaste mediante fuerza

Un sistema ideal es capaz de realizar mediciones del proceso de maquinado, logrando una estimación del desgaste de herramientas de corte. El sistema tolera las condiciones extremas del proceso, es capaz de realizar mediciones de la variable física sin sufrir pérdidas ni alteraciones y existe consistencia en los datos para poder estimar desgaste en la herramienta.

Idealmente, el sistema no sería susceptible a los fenómenos inherentes al proceso, como lo son las variadas frecuencias de operación, los cambios de temperatura, las vibraciones, las afectaciones por crosstalk y el ruido electromagnético. De esta manera, se relaciona la magnitud física (entrada) de manera directamente proporcional a la señal que genera el sistema (salida), es decir, se modela la respuesta mediante una ecuación lineal:

$$y = mx + b \quad (3.13)$$

Donde y es la señal de salida, m la proporción constante, x la señal de entrada y b es un valor constante de *offset*.

A continuación, se describirán las características de un sistema ideal, su comportamiento ante los fenómenos presentes en el maquinado, y las particularidades deseadas.

3.1.1. Respuesta en la frecuencia:

El ancho de banda de elemento sensible y del sistema completo es ilimitado. Es capaz de realizar mediciones de fuerza en todo el rango de frecuencias de operación que se puedan presentar.

Durante el maquinado se generan incrementos repentinos de fuerza; esto es, impulsos y frecuencias altas (del orden de los kHz), debido a que el filo de la herramienta entra en contacto con la pieza de trabajo en momentos específicos de cada revolución. Es posible calcular la frecuencia de contacto de la siguiente manera:

$$F_{contacto} = \frac{\# \text{ de Filos} \times \text{Velocidad del husillo}}{60} \quad (3.14)$$

El sistema ideal es capaz de captar estos cambios bruscos de fuerza gracias a un elemento sensible adecuado para esta aplicación. Además, la instrumentación del sistema posee un *slew rate* a la par, correspondiente a $\approx \infty \text{ V}/\mu\text{s}$, siendo capaz de generar una salida directamente proporcional a estas variaciones repentinas, de manera inmediata. La respuesta de salida no se ve atenuada ni amortiguada de ninguna manera.

Por otro lado, la frecuencia natural del sistema se encuentra fuera del rango de operación del proceso de maquinado y, por lo tanto, no existen resonancias alrededor de esta, por lo que no se generan incrementos en la amplitud de la respuesta.

Para comprender la respuesta del sistema ideal ante distintas frecuencias es posible analizarla mediante la Transformada de Fourier, que convierte una función en el dominio del tiempo a una

en el dominio de la frecuencia. La transformada genera cualquier función continua a través de una suma infinita de senos y cosenos de distintas frecuencias [52] llamada serie de Fourier. Esto tiene la siguiente forma:

$$f(t) = A_1 \sin(\omega t + \Phi_1) + A_2 \sin(\omega t + \Phi_2) + \dots \quad (3.15)$$

Cada término corresponde a una frecuencia, y posee dos características principales: magnitud y fase. La magnitud es la amplitud de la frecuencia en sí (A_n), y la fase (Φ_n) es el atraso respecto de la señal de entrada. Estas características son de interés para conocer las frecuencias dominantes y las armónicas presentes para una frecuencia en específico, así como el tiempo que le toma al sistema reaccionar ante el estímulo. Si se aplica la transformada a cada frecuencia de entrada, será posible identificar además la frecuencia natural, frecuencia de corte y otros datos de interés.

Estas características pueden ser representadas mediante una gráfica de Bode, permitiendo encontrar fácilmente estos puntos de interés. Las características son graficadas en un diagrama semilogarítmico, obteniéndose una gráfica de frecuencia-magnitud y una de frecuencia-fase. Para ello, las magnitudes deben ser convertidas a decibeles (dB). Esto se realiza mediante la siguiente operación:

$$magnitud_{dB} = 20 \log(magnitud) \quad (3.16)$$

Por otro lado, para obtener la fase Φ_n , dada en grados ($^\circ$) o en radianes (rad), es necesario emplear la siguiente ecuación:

$$\Phi_n = 360 t_{\Phi_n} f \quad (3.17)$$

Donde t_{Φ_n} es el tiempo (s) que hay entre el cruce por cero de la senoidal de entrada y el cruce por cero de la senoidal de salida; y f es la frecuencia.

El sistema ideal conservaría una magnitud constante y una fase sin atraso (de un valor de 0°) en un rango infinito de frecuencias, naturalmente incluyendo todo el rango de operación. La gráfica Bode del sistema ideal sería similar a la presentada en la Figura 3.4

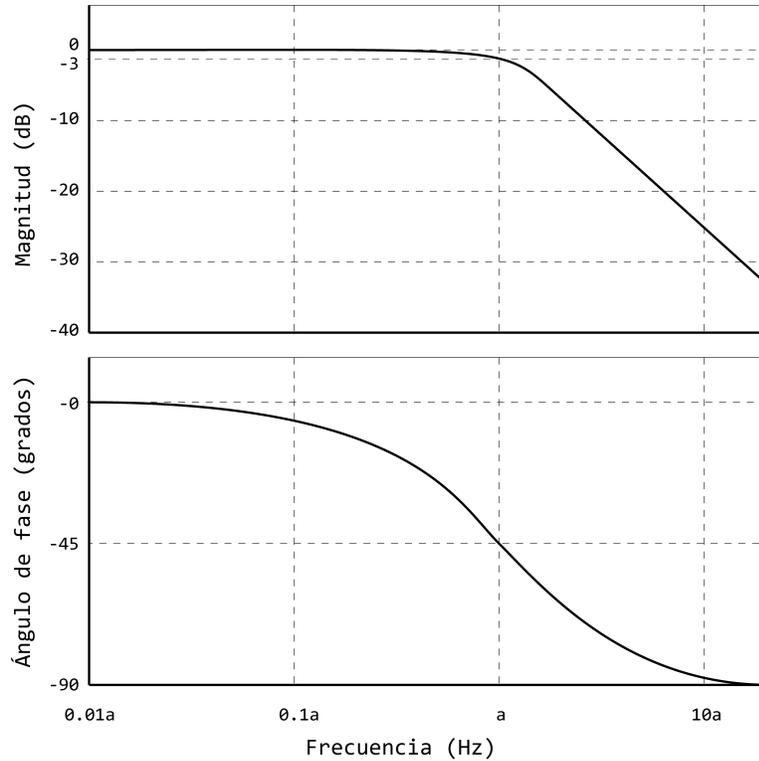


Figura 3.4: Diagrama de Bode de un sistema ideal, donde $a \rightarrow \infty$.

3.1.2. Tolerancia a las variaciones de temperatura:

El sistema no se ve de ninguna manera afectado por cambios de temperatura durante el proceso de maquinado.

Al ser el maquinado un proceso con condiciones de fricción extremas, se generan temperaturas de más de $600\text{ }^\circ\text{C}$ en el punto de contacto de la herramienta y la viruta [1]. La herramienta de corte sufre variaciones de temperatura en forma de ciclos, debido a la acción de corte, y al enfriamiento por refrigerante. De esta manera, se somete el elemento cortante a un ciclo de temperatura por revolución [53] que, como ya fue mencionado, contribuye al desgaste gradual. De esta manera, actuarán sobre el sistema algunos fenómenos como la expansión térmica, el aumento de la resistencia eléctrica, el choque térmico, entre otros. El sistema ideal es capaz de mantener invariabilidad en la información que provee, al no ser afectado por estos.

Nula interferencia cruzada (crosstalk) y ruido electromagnético: La medición de fuerza en un eje no se encuentra afectada por las magnitudes que actúan en el resto de los ejes.

El análisis de las fuerzas de reacción sobre el sistema es facilitado si éstas son aisladas perfectamente en sus componentes perpendiculares, pertenecientes a los ejes XYZ. En este contexto, la manifestación de una componente de un eje sobre de otro es llamada interferencia cruzada. Este fenómeno es indeseado, pues provoca mediciones de fuerza erróneas, al desviarlas del valor real. El sistema ideal no presenta esta manifestación y, por lo tanto, las mediciones son fieles a la fuerza

presente en el proceso.

Susceptibilidad al ruido electromagnético: Las señales eléctricas del sistema no son afectadas por interferencia electromagnética.

En circuitos eléctricos, se manifiesta un fenómeno llamado ruido electromagnético, procedente de la red eléctrica, motores en funcionamiento, entre otras fuentes. Éste puede llegar a afectar la sensibilidad y la medición de las fuerzas. El sistema ideal está diseñado para impedir la propagación de ruido electromagnético interno y la recepción de ruido externo.

Afectaciones por vibraciones: El sistema está diseñado para que las vibraciones en proceso no lo dañen.

Las vibraciones son un fenómeno que se manifiesta en el proceso de maquinado debido a la fricción que ocurre entre la herramienta de corte y la materia prima.

Estas particularidades contribuirían a la robustez y fiabilidad del sistema ideal: se obtiene una lectura fiel a las fuerzas de reacción del proceso que, debido a su linealidad, es fácilmente procesada para fines de estimación del desgaste. Por otro lado, las vibraciones propias del proceso de maquinado no incrementan dramáticamente alrededor de alguna frecuencia natural, de esta manera, evitándose daño agregado al sistema de medición, la materia prima y la herramienta de corte.

Sin embargo, no existe realmente el sistema ideal. Será entonces necesario reducir el impacto de las afectaciones mencionadas desde el diseño y fabricación del sistema, así como mediante postprocesamiento y sensores adicionales con el fin de obtener una medición de fuerza fiel y, por consiguiente, una acertada estimación del desgaste de la herramienta.

3.2. Diseño del sistema de estimación de desgaste

Una de las finalidades más importantes del sistema es la capacidad de realizar una optimización de los procesos de maquinado futuros con los datos obtenidos. Como ya fue mencionado, éstos serán procesados para ser convertidos en información pertinente y útil al operador, con el fin de corregir trayectorias y mejorar otros aspectos del maquinado, tales como tiempo de operación y calidad del producto. En el proceso de remoción de material se presentarán viruta, torrentes de aceite de corte y temperaturas cambiantes que alejarán las mediciones de fuerza del valor real. El sistema deberá estar preparado para soportar y corregir estos. La robustez comprende la compensación de estos factores

Incertidumbre de medición:

Las mediciones de una magnitud física están sujetas a la incertidumbre de medición, que no es más que la dispersión de los valores de la magnitud en sí. El sistema de estimación de desgaste deberá poseer una incertidumbre $< \pm 2\%$ para ser competitivo en el mercado [54], logrando satisfacer las necesidades de la industria actual.

Interferencia cruzada:

De igual manera, la interferencia cruzada en la medición de las componentes de fuerza deberá permanecer en un valor de $< \pm 2\%$ [55], [56]. La manifestación de la interferencia cruzada se puede deber a: errores en la perpendicularidad del sistema debido a fabricación, interferencia electromagnética, capacitancia indeseada, entre otras fuentes. Principalmente, el diseño del mecanismo es crucial para la resolución de este problema, puesto que esta característica recae sobre su ortogonalidad. Por otro lado, sería posible compensar el error generado mediante electrónica, filtrando las señales.

Existen dos métodos básicos para la estimación y reducción de la interferencia cruzada. El primer método consiste en acondicionar el sensor de fuerza de forma mecánica o eléctrica para reducir dicho efecto. A pesar de ser efectivo, este método se ve limitado en la cantidad de señales que pueden ser corregidas. El segundo método consiste en una compensación matemática de las señales de los sensores.

El método de la matriz inversa consiste en procesar las señales de salida de los diferentes sensores en cada uno de los ejes. Se aplica una fuerza conocida sobre un eje determinado y se monitorean los cambios en los sensores de todos los ejes. De esta forma se obtiene la función de transferencia, por ejemplo, del eje X:

$$O_{fx} = K_i \times F_x \quad (3.18)$$

Donde O_{fx} es la señal obtenida en el sensor de la componente X al aplicar la fuerza sobre el mismo eje X. De manera análoga, se genera la siguiente ecuación para la señal del sensor de la componente en Y durante la aplicación de la fuerza sobre el mismo eje X:

$$O_{fy} = K_i \times F_y \quad (3.19)$$

Este proceso se repite con todas las señales obtenidas de cada uno de los ejes. Para un sistema de medición de fuerza de N ejes, el sistema se expresaría de forma matricial de la siguiente manera:

$$O = K \times F \quad (3.20)$$

Donde O es el vector correspondiente a las señales de salida de los sensores, K representa la matriz de valores para la función de transferencia y F es el vector de fuerzas aplicadas sobre los diferentes ejes del sistema. La matriz K es necesaria para compensar el nivel de crosstalk del sistema. [3.21](#)

$$K = \begin{bmatrix} K_1 & \dots & K_N \\ K_i & \dots & K_m \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

$$O = \begin{bmatrix} O_1 \\ \dots \\ O_N \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

$$F = \begin{bmatrix} F_1 \\ \dots \\ F_N \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

Para resolver la ecuación 3.20, se debe multiplicar ambos lados de la ecuación por la matrix inversa K^{-1} . Obteniendo la expresión 3.24

$$F = K^{-1} \times O \quad (3.24)$$

La matriz K se puede obtener dividiendo las salidas registradas de los sensores entre la escala completa la salida de cada sensor, es así que para obtener el primer renglón de la matriz K se debe dividir cada señal registrada de la aplicación de fuerza en ese eje sobre la escala máxima del sensor y así consecuentemente con todos los ejes. Una vez obtenida la matriz K , pueden usarse diferentes métodos para obtener la matriz inversa K^{-1} , para fines prácticos puede usarse una computadora con un software especializado como Matlab o través de métodos matemáticos como Gauss-Jordan 57.

Ruido electromagnético:

La electrónica también se verá afectada por factores internos y externos. El ruido electromagnético podrá ser reducido aterrizando el sistema, blindando los componentes electrónicos y filtrando las señales, lográndose una lectura de fuerza más fidedigna.

Slew rate:

El *slew rate* estará limitado por la respuesta de su elemento sensible y la velocidad de la electrónica que procesará la información que provee el sensor. Se debe hacer una selección de estos componentes para poder lograr una respuesta lo más rápida posible, cumpliendo con la característica de un sistema de procesamiento en tiempo real.

Respuesta en la frecuencia:

Puesto que los sistemas mecánicos se comportan como un filtro pasabajas, de manera análoga a como lo haría un filtro electrónico, la respuesta del sistema naturalmente se verá atenuada en frecuencias altas. Aunque no se puede eliminar del todo, es posible contrarrestar este efecto hasta cierto punto diseñando un sistema físico con una masa y geometría específicas. Por otro lado, la frecuencia natural del sistema deberá ser alejada del rango de operación del proceso de maquinados para evitar resonancias que podrían dañar el equipo. Esto se logra también a través de diseño, instalando amortiguadores que absorben la energía, entre otras técnicas.

Afectaciones por temperatura:

El sistema es propenso a cambios en el funcionamiento de sus sensores, partes mecánicas y elementos eléctricos debido a los cambios de temperatura del proceso de remoción de material. La estabilidad en un amplio rango de temperatura puede ser lograda realizando una corrección de las mediciones realizadas por los sensores, esto a través de programación, compensando los posibles cambios de escala del sensor. Otra manera de asegurar la estabilidad es seleccionando componentes capaces de operar en temperaturas extremas y contemplando los coeficientes de expansión térmica de los materiales que constituirán el sistema. Por otro lado, la temperatura puede ser reducida mediante chorros de lubricante, gracias a que éstos disminuyen la fricción y a que el fluido conduce

térmicamente por sí mismo, removiendo calor de la operación.

Sensibilidad:

El sistema deberá contar una adecuada sensibilidad a los cambios de fuerza con el fin de que el dispositivo sea capaz de detectar órdenes de magnitud suficientemente reducidos, y así garantizar una correcta estimación. De esta manera, la sensibilidad se encontrará a la par de las necesidades del consumidor final. Esta característica depende en gran medida de los sensores utilizados y la electrónica que procesará sus señales.

Escalabilidad:

El sistema creado deberá ser escalable a diferentes aplicaciones, por lo que pueden adaptarse sensores con mayor sensibilidad o mayor rango, adaptar el tamaño o funcionalidad según sean las necesidades del cliente.

Medición en línea:

Otra característica importante del sistema será la posibilidad de realizar mediciones en línea con el proceso y de manera no invasiva, en otras palabras, sin interrumpir o entorpecer el proceso de ninguna manera. La naturaleza del elemento sensible, la manera en que se realiza la medición y el diseño mecánico permitirán resolver este problema. Esta característica representaría una gran ventaja del sistema sobre la mayoría de los ya disponibles en el mercado.

Finalmente, debido a la robustez del sistema ante todos estos factores, sería posible implementar un modelo matemático para estimar el desgaste de manera cuantitativa, ya sea a través de la ecuación de Taylor, la ecuación expandida, o un modelo propio propuesto.

Metodología

La metodología propuesta para el desarrollo del presente trabajo está basada en el Nivel de Madurez Tecnológica (TRL, por sus siglas en inglés) de la NASA, que es un sistema de evaluación del nivel de desarrollo de un proyecto tecnológico. Se le asigna un valor entre 1 (más bajo) y 9 (más alto) [58], [59]. A continuación, se menciona cada uno de los niveles que integran esta metodología.

4.1. Niveles de Madurez Tecnológica

Cuando la tecnología se encuentra en un nivel **TRL-1**, el proyecto ha iniciado con la investigación científica básica. Sus resultados serán trasladados a una futura etapa de investigación aplicada y de desarrollo (I+D).

Un nivel **TRL-2** es alcanzado una vez que han sido estudiados los principios básicos y las aplicaciones prácticas. Este nivel puede llegar a ser especulativo, debido a las pocas o nulas pruebas de concepto que se tienen.

La tecnología puede ser elevada a un nivel **TRL-3** en el momento que el diseño y la investigación aplicada comienzan. Se genera una prueba de concepto (PdC) a partir de estudios tanto analíticos como de laboratorio para demostrar si la tecnología es viable y está lista para continuar con el desarrollo.

Una vez que la PdC tecnológica está lista, es posible probar piezas de múltiples componentes, unas con otras, para su validación en un ambiente de laboratorio. En este punto, un nivel **TRL-4** es alcanzado.

El nivel **TRL-5** es una continuación directa del nivel anterior, realizándose pruebas más rigurosas, validando los componentes y prototipos en un ambiente relevante, muy similar a las condiciones operativas reales.

Tras estas pruebas, es posible avanzar al nivel **TRL-6**. Una tecnología de este nivel comprende un prototipo funcional o un modelo representativo. Las pruebas de ambiente relevante deben considerar condiciones industriales, no de laboratorio, experimentales o académicas.

Cuando se cuenta con un prototipo completo demostrado en ambiente relevante, el nivel de madurez se encuentra en **TRL-7**.

El nivel **TRL-8** cuenta con una tecnología completa que ha sido evaluada a través de pruebas y demostraciones que resuelven cuestiones operativas y de fabricación.

En el último nivel, **TRL-9**, la tecnología se encuentra en su forma final. Es funcional en un sinnúmero de condiciones operativas.

4.2. Enfoque de la investigación

El presente trabajo fue diseñado bajo un enfoque metodológico cuantitativo, puesto que de esta manera se satisfacen las necesidades de la investigación. Se probará la hipótesis a través de la recolección de datos con base en la medición numérica y el análisis estadístico, aceptando o rechazando la misma.

4.3. Diseño conceptual del dispositivo

Con base en las características de un sistema de medición de fuerza ideal, descritas en la Sección 3 se propuso el diseño de un dispositivo que cumpliera con lo siguiente:

1. Ancho de banda de medición suficiente para el rango de operación del maquinado.
2. Frecuencia natural fuera del rango de operación.
3. *Slew rate* acorde a la respuesta de salida esperada.
4. Tolerancia a las variaciones de temperatura.
5. Baja interferencia cruzada ($< \pm 2\%$ [55], [56]).
6. Robustez ante interferencia electromagnética.
7. Robustez ante las condiciones extremas del proceso.

Para ello, fue importante considerar los factores conocidos y controlables, identificar los factores desconocidos e incontrolables y proponer un método de análisis para separar los efectos de cada factor. Tras esto, se propusieron etapas mecánicas, de instrumentación, adquisición y procesamiento, que, en conjunto, conforman el sistema de estimación de desgaste completo. El siguiente diagrama funcional ilustra la interacción de éstas:

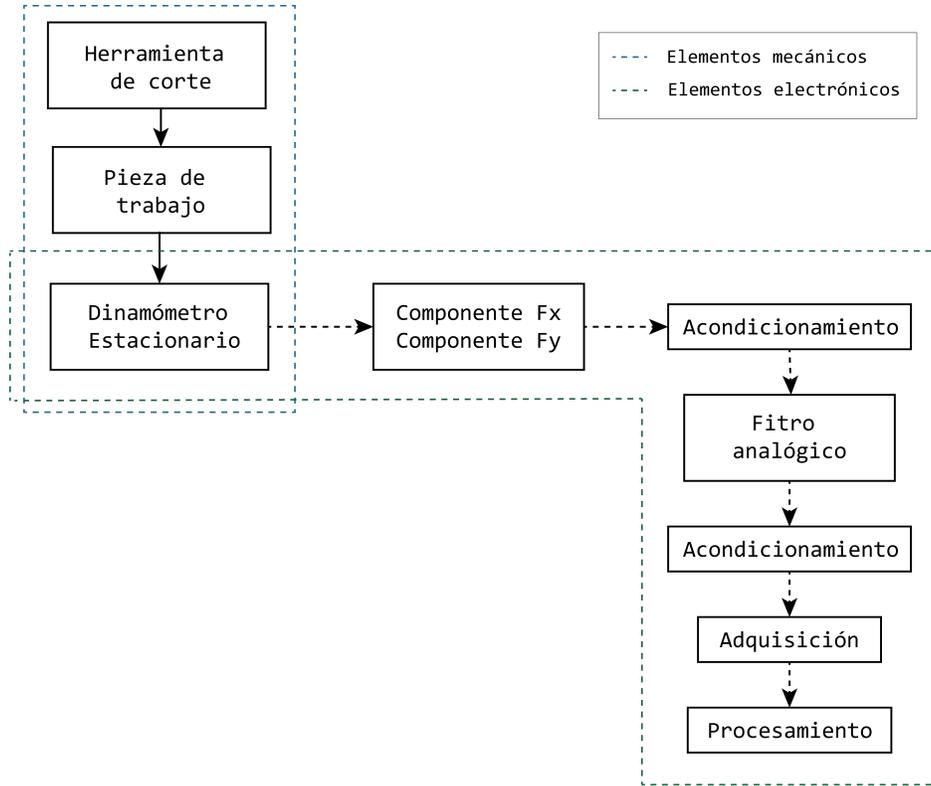


Figura 4.1: Diagrama a bloques del sistema de estimación de desgaste.

4.4. Diseño del sistema

Para comenzar a definir el funcionamiento del sistema, es necesario delimitar el rango de frecuencias en las que operará éste. Partiendo de los límites de operación de un centro de maquinados, se toman en cuenta las velocidades de corte de un centro de maquinados convencional, que son de alrededor de 6,000 RPM [10]. Además, las herramientas de corte son encontradas desde 1 filo (gavilán) hasta 6; por lo tanto, para este estudio se acotará a una velocidad de corte de 10,000 RPM, con herramientas de un máximo de 4 filos. De esta manera, sustituyendo en la ecuación 3.14, la frecuencia máxima de operación es:

$$F_{contacto} = \frac{10000 \text{ RPM}}{60 \text{ s}} \times 4 = 666.67 \text{ Hz} \quad (4.1)$$

Además, es de importancia considerar el número de armónicos (múltiplos de la frecuencia fundamental) que se desean monitorear, de tal forma que, si se considera analizar hasta el armónico $n = 9$, la frecuencia máxima de operación F_{max} es la siguiente:

$$F_{max} = F_{contacto} \times n = 666.67 \times 9 = 6000 \text{ Hz} \quad (4.2)$$

De esta manera, se define que el rango de frecuencias en las que opera el sistema es de 0 a 6,000

Hz, donde el cero no es incluido:

$$(0, 6000] \text{ Hz} \quad (4.3)$$

Se buscó la escalabilidad del sistema realizando un diseño modular, lo que posibilita la adición de elementos sensitivos con mayor precisión o mayor rango. De esta manera, se buscó adaptar el tamaño o funcionalidad según sean las necesidades del cliente.

4.4.1. Principio de medición

Considerando las ventajas y desventajas de cada método de medición presentado en la Sección 2, Revisión de Literatura, y en cumplimiento con las características (1), (4) y (6), se seleccionó el método de medición como medición indirecta, donde la variable física a medir es la fuerza. Al obtener la fuerza de reacción presente en el proceso de maquinado, es posible estimar el desgaste del herramienta.

El sistema fue diseñado para desplegar la fuerza total (fuerza resultante) F_r , a través de la medición de sus componentes ortogonales F_x y F_y , pertenecientes al plano horizontal. La siguiente ecuación presenta la relación que existe entre estas fuerzas:

$$F_R = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} \quad (4.4)$$

Es entonces requerido realizar una medición independiente de cada componente de fuerza, adquirir esta medición, procesar, calcular, y finalmente, desplegar los resultados. El diseño del sistema contempló varias etapas de distinta naturaleza para lograr este fin.

4.5. Etapas del sistema

El sistema completo de estimación de desgaste en herramienta a través de fuerza fue dividido en cuatro etapas principales: 1) Mecánica, 2) Instrumentación, 3) Procesamiento, y 4) Interfaz de usuario. El flujo de datos es dado en este mismo orden: la etapa mecánica está en contacto con la pieza de trabajo. Esta etapa transmite la fuerza del proceso a la etapa de instrumentación, compuesta por sensores que, a su vez, emiten una señal de voltaje adquirida y procesada por la electrónica. Finalmente, el despliegue de los datos se realiza a través de un osciloscopio. A continuación, se detallará el funcionamiento de cada una de estas etapas.

4.5.1. Etapa mecánica

Teniendo en cuenta el planteamiento de la separación de las fuerzas en sus componentes ortogonales, a través de la ecuación (4.4), la primera etapa corresponde a la implementación de un sistema físico que está en contacto directo con el proceso de maquinado. Las consideraciones específicas de esta etapa, en el cumplimiento de las características (1), (2), (4), (5) y (7), son las siguientes:

- Desacoplar las mediciones de fuerza en los ejes ortogonales del plano horizontal.
- Crear un sistema con mínima fricción entre las partes móviles.

- Dimensionar el dispositivo según los sensores de fuerza seleccionados.
- Implementar un sistema para la precarga de los sensores de fuerza utilizados.

Versiónes del diseño mecánico.

Se realizaron continuas iteraciones del diseño mecánico, que dieron paso a la versión presentada en este documento. El objetivo fue mejorar los mecanismos, y cumplir con los requerimientos de funcionalidad propuestos. Las primeras dos versiones únicamente alcanzaron la fase de ingeniería básica, correspondiente a un TRL-2; no fueron manufacturadas. La tercera versión fue la primera en ser elaborada, pasando por las etapas de Ingeniería de Detalle, Ejecución del proyecto y pruebas de validación [60]. A partir de esta, se realizaron correcciones que dieron paso a la cuarta y última versión. El diseño mecánico en todas sus versiones es completamente original.

A continuación, se presentan estas versiones y sus características principales.

- **Versión 1:** abstracción del mecanismo básico. No se considera la colocación de sensores de fuerza. La sujeción de pieza de trabajo está limitada por las posiciones determinadas de los agujeros maquinados. No existe método de sujeción al centro de maquinado. Para esta versión, todas las consideraciones se toman a nivel diseño. Se muestra en la Figura 4.2a.



(a) Versión 1



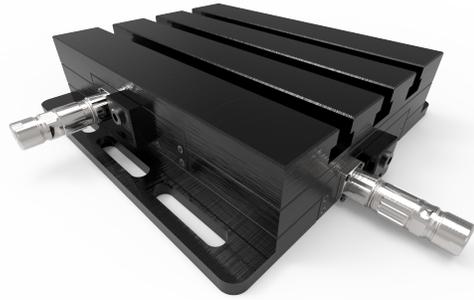
(b) Versión 2

Figura 4.2: Versiones conceptuales de la etapa mecánica

- **Versión 2:** cuenta con cavidades básicas para la integración de sensores de fuerza. Se incorpora un método más flexible de sujeción de la pieza de trabajo, pero aún no existe un método de montaje al centro de maquinado. Los detalles del ensamble están poco trabajados, los mecanismos son básicos. Las consideraciones aún se toman a nivel diseño. Es posible observar esta versión en la Figura 4.2b.
- **Versión 3:** se incorpora un método de sujeción del mecanismo al centro de maquinado, aunque se encuentra un tanto limitado. La sujeción de la pieza de trabajo es mejorada y estandarizada. Se integran mejoras mecánicas en la cavidad de los sensores. Esta es la primera versión que sería manufacturada. Una renderización de esta versión es mostrada en la Figura 4.3a.



(a) Versión 3



(b) Versión 4

Figura 4.3: Versiones manufacturadas de la etapa mecánica

- **Versión 4:** se mejora la sujeción del mecanismo al centro de maquinado. Se integran sensores de temperatura (termistores). Se diseña e implementa un método de precarga para los sensores de fuerza, con el fin de mejorar la seguridad y facilidad de operación. Se adicionan mejoras en algunas de las características geométricas del sistema para una mejor tolerancia a un entorno real de maquinados. Se agregan características para la implementación de conectores industriales, posibilitando la transmisión de señales de manera práctica y segura. La renderización de esta versión es encontrado en la Figura [4.3b](#).

Elementos del mecanismo final

En la Figura 4.4 se presenta un modelo explosionado del diseño mecánico final. En este es posible apreciar cada una de las piezas que conforman la etapa mecánica de la mesa de fuerza multisensorial.

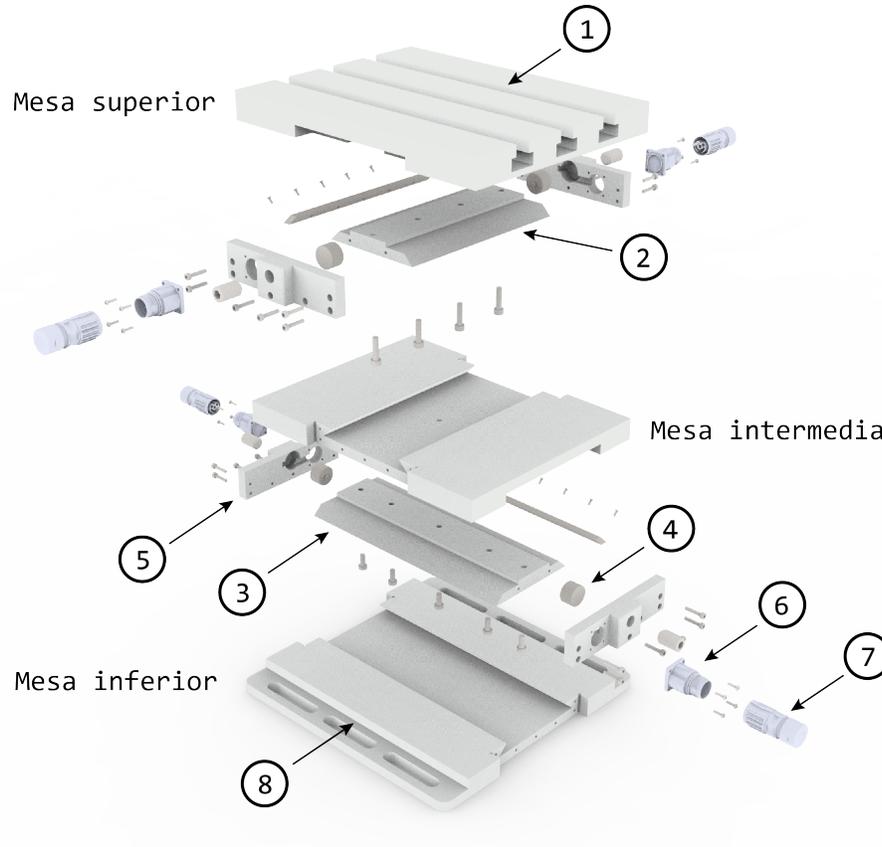


Figura 4.4: Modelo explosionado de la etapa mecánica

La **mesa superior** posee ranuras T (1) alineadas al estándar ISO 299:1987 *Machine tool tables - T-slots and corresponding bolts* [61], que permiten sujetar la pieza de trabajo que será maquinada. Tanto esta como la **mesa intermedia** poseen colas de milano (2) y (3), respectivamente, para transmitir los componentes ortogonales de fuerza a cada par de sensores (4). La cola de milano de la mesa intermedia permite el deslizamiento transversalmente, mientras que la del nivel superior limita el movimiento a un deslizamiento longitudinal.

Los dos pares de tapas (5) poseen un mecanismo de precarga y sujeción para los sensores de fuerza elegidos en la etapa de instrumentación. La precarga de estos se realiza manualmente apretando los opresores (6). Sobre las tapas se encuentran montados conectores de grado industrial con protección IP67 (7) para la transmisión de las señales procedentes de los sensores de fuerza y los termistores.

La **mesa inferior** cuenta con ranuras de sujeción (8) que posibilitan el montaje del sistema a la bancada del centro de maquinado. A partir de éstas, se define el eje coordenado: el eje longitudinal (eje X) es paralelo a las ranuras, mientras que el eje transversal (eje Y) es perpendicular a éstas. Se definió una configuración de las celdas en los ejes, con las celdas 1 y 3 en el eje x , y las celdas 2 y 4 en el eje y . Esta convención de ejes y celdas es mostrada en el ensamble del sistema mecánico (Figura 4.5).

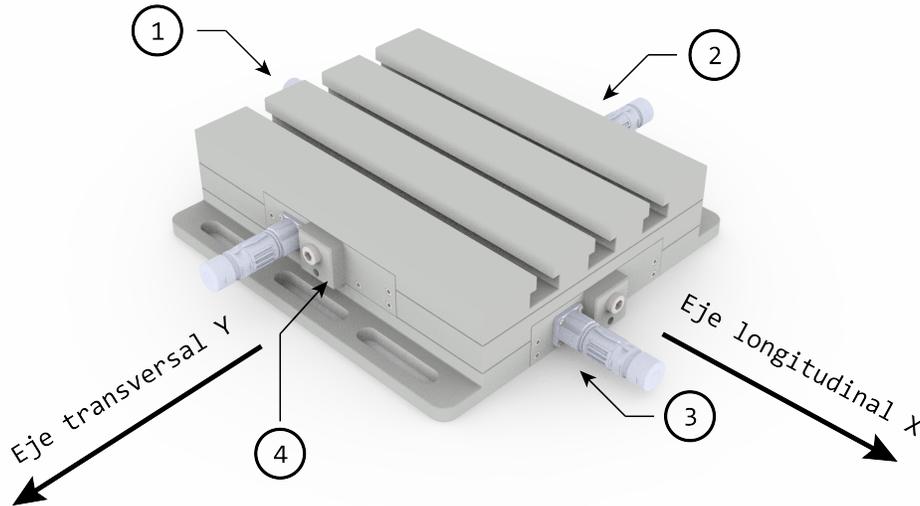


Figura 4.5: Modelo ensamblado de la etapa mecánica. Se define el plano de operación y la distribución de las celdas.

Planos de fabricación

Se generaron planos para la fabricación del sistema mecánico seleccionando materiales que posibilitaran su funcionamiento. Se contemplaron aspectos como la fricción entre piezas, resistencia a las condiciones extremas del maquinado, disponibilidad de materia prima, acabado superficial, tornillería, herramental para el maquinado, entre otras. Se buscó crear un diseño funcional y lo más económico posible. Se llevó a cabo la manufactura de la versión 3, y la adición de las mejoras que dieron paso a la versión 4.

Uno de los aspectos más importantes para el proceso de diseño mecánico y la generación de los planos de fabricación fue el manejo de tolerancias. Fue esencial contemplarlas desde la primera hasta la última versión.

La naturaleza de los procesos de maquinado impide generar piezas con dimensiones exactas [62], por lo que es necesario delimitar un tamaño real entre dos dimensiones que sean compatibles con el funcionamiento correcto de la pieza. Este rango de dimensiones es llamado tolerancia.

Existen libros y manuales que contienen tablas estandarizadas ISO para la especificación estas tolerancias en función de este juego o aprieto requerido para la aplicación, además de simbología para la creación de planos mecánicos [63], [62]. Se realizó la selección de las tolerancias, variando

desde permisión de mucho juego (para aplicaciones de dilatación, alineación deficiente, entre otros), hasta aquellas que imposibilitarían el desmontaje de la pieza sin deterioro. Para el diseño del mecanismo se recurrió a los siguientes tipos de tolerancias:

Tolerancias dimensionales. Se define como la cantidad total que es permitido variar una dimensión especificada en el plano respecto de la cota nominal. Afectan directamente la linealidad y angularidad de la pieza. Es posible observar ejemplos de ambas en el diseño de la etapa mecánica en la Figuras 4.6a y 4.6b, respectivamente.

Tolerancias geométricas. Las tolerancias geométricas afectan la forma y posición de un elemento, no sus dimensiones. Algunos ejemplos de tolerancias de este tipo son linealidad, inclinación, concentricidad, perpendicularidad y paralelismo. En las Figuras 4.7a y 4.7b es posible observar tolerancias de estos últimos dos tipos, respectivamente.

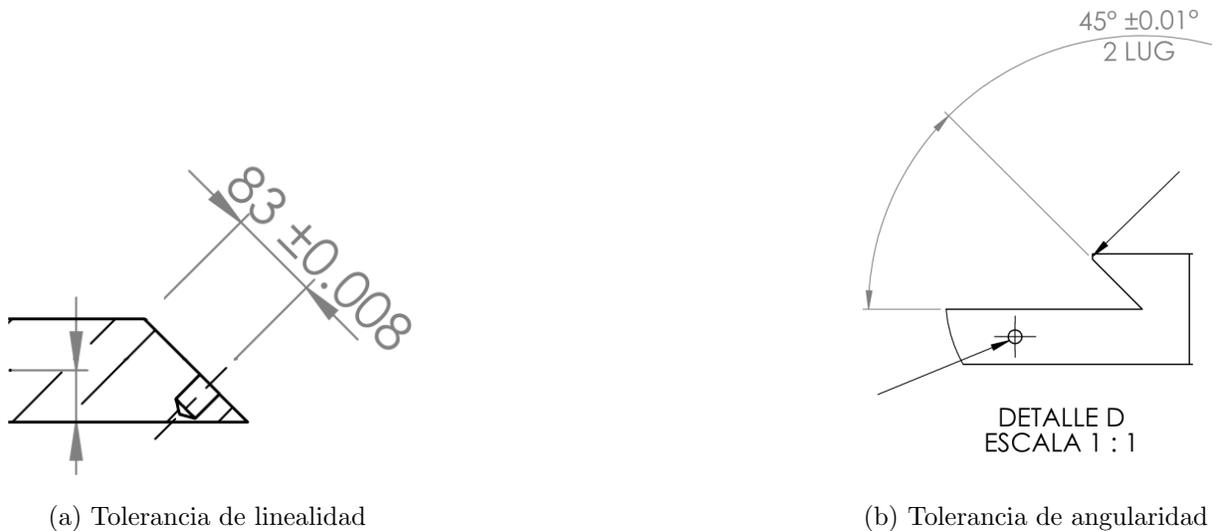


Figura 4.6: Ejemplos de uso de tolerancias dimensionales

Se han omitido detalles en los planos mecánicos con el fin de proteger la integridad de la patente pendiente, generada a partir de este diseño. Los detalles de ésta se abordarán más adelante.

La etapa mecánica se mantiene en contacto directo con el proceso de maquinado, recibiendo la fuerza. A su vez esta fuerza es transmitida a la etapa siguiente en forma de desplazamiento.

4.5.2. Instrumentación – Sensores de fuerza

Para la medición de las fuerzas de reacción transmitidas por la etapa mecánica, es necesario emplear un sensor. Tras analizar la comparativa de los distintos sensores para este fin, presentada en el Capítulo 2, se seleccionó la celda de carga de botón como elemento sensible.

La celda de carga es un transductor que convierten fuerza en una salida eléctrica medible, generalmente del orden de milivolts [64], [65], [66]. Cuenta con un elemento estructural que se deforma

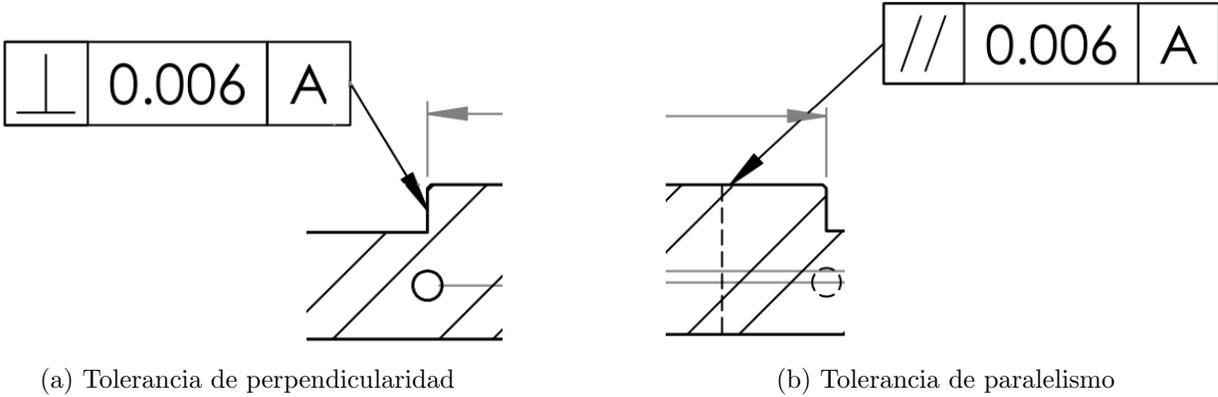


Figura 4.7: Ejemplos de uso de tolerancias geométricas

cuando se le aplica una fuerza (carga). Esta deformación cambia la resistencia eléctrica del material de manera proporcional. El elemento es conectado a un arreglo de resistencias que, al introducir un voltaje conocido, genera la salida en voltaje proporcional a la fuerza aplicada, posibilitándose la lectura con circuitos como convertidores analógico-digitales. Existen de distintos tipos de celda de carga: tipo S, que puede medir cargas en tensión o compresión [67]; tipo barra, que mide la carga a través de la flexión de la celda en cantiléver [68]; de compresión, que mide únicamente la carga en compresión [65]; entre otros.

La celda de carga de botón (Figura 4.8) es un tipo de celda de compresión. Se caracteriza por su fiabilidad, precisión, extenso rango de medición y tamaño reducido. Para este sensor, la deformación ocurre cuando existe un desplazamiento que comprime el botón de la celda, sin embargo, al contar con un alto grado de rigidez, se evitan grandes deformaciones, resultando en cambios de dimensiones mínimos (de decenas de μm [65], [64], [66]), por lo que en un entorno de maquinado donde conservar las dimensiones es crucial, las afectaciones al proceso son prácticamente despreciables.



Figura 4.8: Celda de carga de botón Omega LM304-5K

El modelo de celda de carga de botón LCM302-1k Omega fue seleccionado de acuerdo a las necesidades de la aplicación, contemplándose sus características para el diseño mecánico y electrónico. Sus características principales son: dimensiones de 19 mm radio por 12.7 mm de alto, rango de medición de hasta 4,448 N, protección IP54 y deflexión de hasta 80 μm . La hoja de datos proporcionada por el fabricante provee esta información con detalle [65]. En ella también es posible encontrar el rango de temperatura de funcionamiento, valor de sobrecarga, características eléctricas y mecánicas. Adicionalmente, tras la adquisición, el fabricante incluye los datos de calibración e histéresis únicos para cada celda. Es posible encontrar estas hojas de calibración en el Apéndice B.

Implementación de los sensores de fuerza

Se diseñó el sistema contemplando una disposición de los sensores de fuerza en un arreglo de dos por cada eje ortogonal. Cada par de sensores es colocado de manera que, al introducirse una fuerza de manera paralela al eje, uno experimenta fuerza en compresión y el otro, fuerza en tensión. En la Figura 4.9 se muestra un diagrama del posicionamiento en un eje.

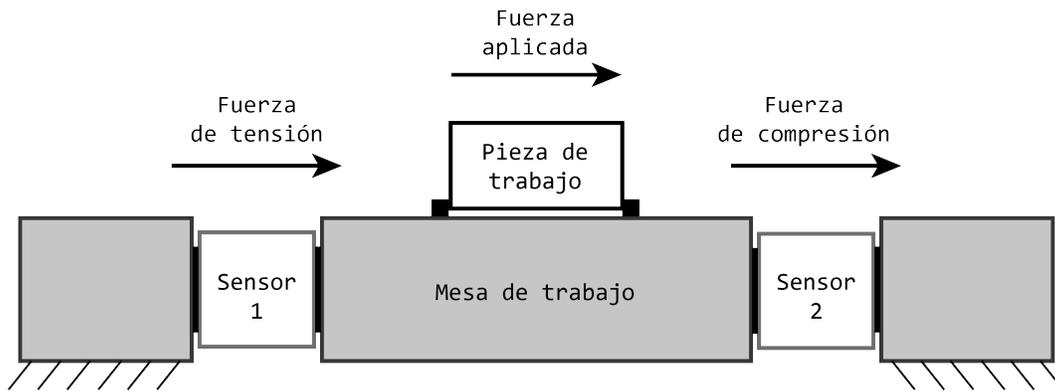


Figura 4.9: Modelo explotado de la etapa mecánica

Este arreglo permite tener una medición tanto de la magnitud como de la dirección de la fuerza aplicada. Además, al generar una salida diferencial de señales complementarias, se aporta a la robustez del sistema mediante la reducción del ruido electromagnético, la corroboración de las mediciones, entre otras ventajas en procesamiento que se mencionarán más adelante.

La siguiente ecuación expresa la fuerza que se obtiene en cada eje ortogonal F_i de forma generalizada:

$$F_i = \frac{F_1 - F_2}{2} \quad (4.5)$$

donde F_1 y F_2 son la fuerza experimentada en el sensor 1 y sensor 2 respectivamente.

Por lo tanto, la fuerza experimentada en cada eje ortogonal es:

$$F_x = \frac{F_{x1} - F_{x2}}{2} \quad (4.6)$$

$$F_y = \frac{F_{y1} - F_{y2}}{2} \quad (4.7)$$

Una vez obtenida cada componente, como ya fue descrito, se emplea la ecuación (4.4), obteniéndose la magnitud de la Fuerza resultante F_r .

Por otro lado, la dirección (ángulo) de la fuerza es dada por:

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{F_y}{F_x} \right) \quad (4.8)$$

Estas dos ecuaciones son suficientes para un sistema de medición de fuerzas ideal, en el que se considera únicamente el plano horizontal.

Debido a la naturaleza de las celdas de carga, sólo es posible obtener una medición de fuerza correspondiente a una carga en compresión. Para poder lograr la medición tanto en compresión como en tensión, es necesario realizar una precarga al 50 % de la capacidad nominal, posibilitando movimiento en ambas direcciones y, por lo tanto, ambos tipos de cargas.

El valor en fuerza de la precarga F_{pre} es expresado mediante la siguiente ecuación:

$$F_{pre} = \frac{\text{Valor nominal de fuerza}}{2} \quad (4.9)$$

De esta manera, se posibilita la obtención de señales de voltaje relacionadas con las fuerza de reacción de la operación de corte. En el flujo de información, la siguiente etapa deberá recibir estas señales para su procesamiento.

4.5.3. Instrumentación – Acondicionamiento

Para poder adquirir y procesar las señales generadas por las etapas previas, se desarrolló una tarjeta electrónica analógica que comprende la etapa de acondicionamiento de señales. La tarjeta cuenta con las siguientes características:

- 4 entradas diferenciales para cada una de las celdas de carga.
- Opción para seleccionar el tipo de salida, unipolar o bipolar.
- Opción para seleccionar el de voltaje de referencia en la salida de señales unipolares.
- Amplio rango en el voltaje de entrada.

El circuito cuenta con tres elementos principales: amplificación, filtrado y protección de sobrevoltaje a la salida. A continuación, se muestra un diagrama a bloques simplificado.

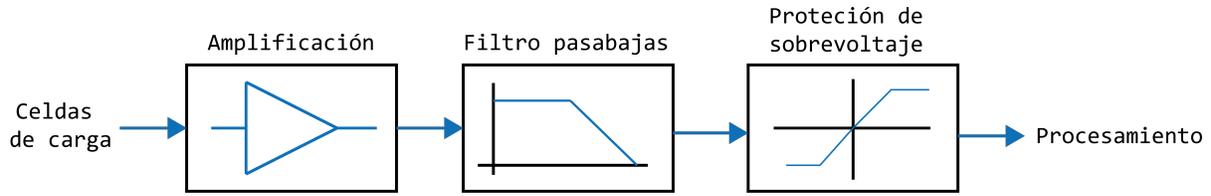


Figura 4.10: Diagrama simplificado de la etapa electrónica.

Diseño electrónico - Amplificación

Para determinar los valores de ganancia de la etapa de amplificación fue necesario conocer las características eléctricas de las celdas de carga utilizadas. Esta información es obtenida de la hoja de calibración, única para cada celda.

En la etapa de amplificación, se utilizaron amplificadores operacionales de instrumentación. El modelo seleccionado fue el **INA849** de Texas Instruments, que cuenta con las siguientes características [69]:

- Amplio ancho de banda de hasta 28 MHz.
- Bajo ruido de entrada con $1 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$.
- *Slew rate* de $35 \text{ V}/\mu\text{s}$.
- Rechazo al modo común de 120 dB.
- Temperatura de operación de $-40 \text{ }^\circ\text{C}$ a $+125 \text{ }^\circ\text{C}$.

La Fig. XX muestra el diagrama simplificado del INA849:

El voltaje de salida V_o del amplificador de instrumentación es expresado por la ecuación:

$$V_o = G(V_{+in} - V_{-in}) + V_{ref} \quad (4.10)$$

Por otro lado, la ganancia del amplificador es dada por:

$$G = 1 + \frac{6000 \Omega}{R_G} \quad (4.11)$$

Despejando R_G de la ecuación (4.11), se obtiene lo siguiente:

$$R_G = \frac{6000 \Omega}{G - 1} \quad (4.12)$$

Para poder determinar el valor de R_G es necesario conocer la ganancia requerida por el amplificador. Por esta razón se debe considerar el valor de salida máximo de las celdas de carga y el valor de salida máximo deseado en la etapa de amplificación. Por lo tanto, la ganancia del amplificador también se puede determinar con la siguiente ecuación:

$$G = \frac{V_{o_{max}}}{V_{sensor_{max}}} \quad (4.13)$$

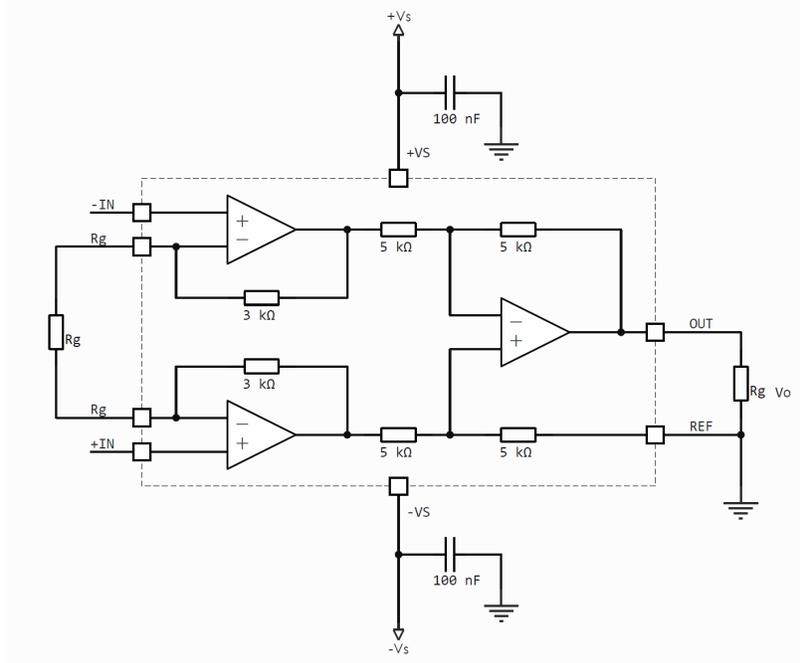


Figura 4.11: Tarjeta de instrumentación *INA-4LC-8NTC*

Para fines prácticos, el valor de $V_{sensor_{max}}$ es tomado de la celda 1 (Véase: [B](#)). Para obtener el valor de $V_{o_{max}}$, se considera el valor de voltaje de operación en los sistemas de adquisición. Por lo tanto, los valores tomados son los siguientes: $V_{sensor_{max}} = 4.365 \text{ mV}$ y $V_{o_{max}} = 3.0 \text{ V}$. Por lo tanto, la ganancia calculada que se necesita para amplificar la señal de las celdas de carga es:

$$G_C = \frac{3.0 \text{ V}}{0.004365 \text{ V}} = 687 \quad (4.14)$$

Sustituyendo ([4.14](#)) en ([4.12](#)), se obtiene un valor de $R_G = 8.74 \Omega$. Con el objetivo de utilizar un valor de resistencia comercial, se seleccionó una $R_G = 10 \Omega$, de modo que, usando la ecuación ([4.11](#)), la ganancia real es la siguiente:

$$G_R = 1 + \frac{6000 \Omega}{10 \Omega} = 601 \quad (4.15)$$

Diseño electrónico - Filtrado

Una vez realizada la amplificación de las señales de voltaje, la etapa de filtrado se encarga de acondicionar. La etapa de filtrado comprende un filtro pasa-bajas por cada canal. Este filtro está dado por un circuito RC, como se muestra en la Figura [4.12](#)

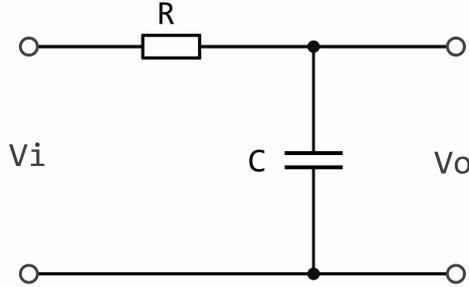


Figura 4.12: Circuito RC, tomado como fitro pasa-bajas pasivo.

La frecuencia de corte F_C puede ser calculada con la siguiente ecuación:

$$F_C = \frac{1}{2\pi \times R \times C} \quad (4.16)$$

Para seleccionar la frecuencia de corte del filtro fue necesario considerar el ancho de banda en el cual puede operar el mecanismo. En la ecuación 4.2 se propone un valor máximo de operación $F_{max} = 6000$ Hz, que puede ser utilizado como la frecuencia de corte. Por lo tanto, se define $F_C = F_{max}$.

Entonces, al tomar un valor de capacitancia comercial de 380 nF, y una frecuencia de corte de $F_c = 6000$ Hz, el valor de la resistencia se calcula despejando de la ecuación 4.16:

$$R = \frac{1}{2\pi \times F_C \times C} = \frac{1}{2\pi \times 6000 \times 380 \times 10^{-9}} = 69.8 \Omega \quad (4.17)$$

Puesto que el valor calculado de la resistencia no es un valor comercial, el valor real de la resistencia seleccionada es de $R = 70 \Omega$, por lo tanto, el valor ajustado de la frecuencia de corte es $F_C = 5983.26$ Hz.

Diseño electrónico – Protección de sobrevoltaje

Debido a que los convertidores de señal analógico-digital (ADC, por sus siglas en inglés) de los sistemas de adquisición pueden dañarse si la entrada de estos excede el nivel de voltaje indicado en los parámetros eléctricos, estos podrían experimentar una degradación en el desempeño e incluso fallas que pueden comprometer su funcionalidad. Por esta razón se implementó una etapa de protección de sobrevoltaje, la cual consiste en el uso de diodos de respuesta rápida, llamados diodos Schottky, para proteger las entradas de los sistemas de adquisición que sean conectados, con esto se pretende evitar que el voltaje en la entrada de los ADC sea mayor a 5 V.

4.5.4. Diseño de las tarjetas electrónicas

Los elementos que conforman el sistema de acondicionamiento fueron distribuidos en dos tarjetas electrónicas: instrumentación analógica y de distribución.

La primera tarjeta, denominada *INA-4LC-8NTC*, consiste en una placa en la que se concentran los circuitos de acondicionamiento dimensionados con los cálculos descritos en la Sección [4.5.3](#). La tarjeta fue diseñada para aplicaciones de monitoreo tanto de señales diferenciales como señales de terminación sencilla (*ended front*). Cuenta con 4 entradas para celdas de carga y 8 entradas para termistores de coeficiente negativo (NTC, por sus siglas en inglés), para su funcionamiento requiere de una alimentación de ± 5 V.

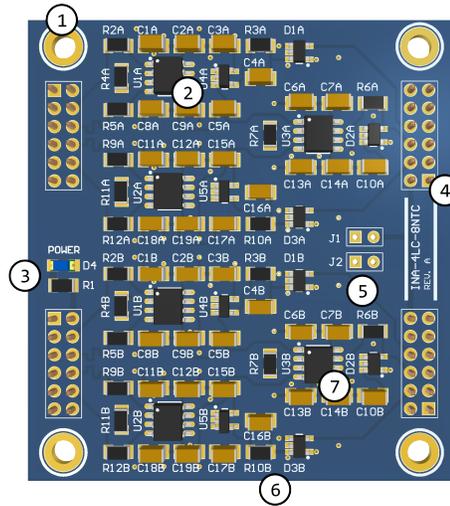


Figura 4.13: Tarjeta de instrumentación *INA-4LC-8NTC*

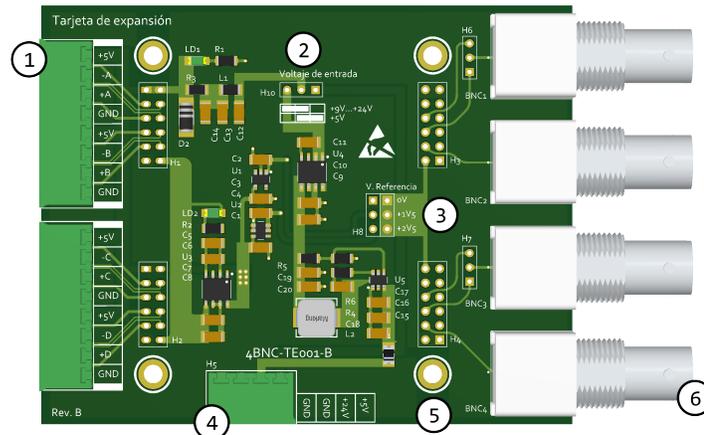
En la Figura [4.13](#) se muestra el modelo 3D de la tarjeta electrónica, cuenta con 4 orificios de 3 [mm] (1) para la colocación de separadores, 4 amplificadores de instrumentación INA849 (2), 1 LED (3) indicador de alimentación, 4 conectores tipo IDE (4) para la interconexión con la tarjeta de distribución, 1 selector de voltaje de referencia (5), 4 circuitos de filtro pasa-bajas (6) y 2 circuitos de protección de sobrevoltaje (7).

Por otro lado, la tarjeta de distribución posee conectores para facilitar la organización y repartición de las señales provenientes de los sensores de fuerza. Esta tarjeta tiene dos variantes: la versión *4BNC-TI-E001-B* y la versión *TI-E001-B*.

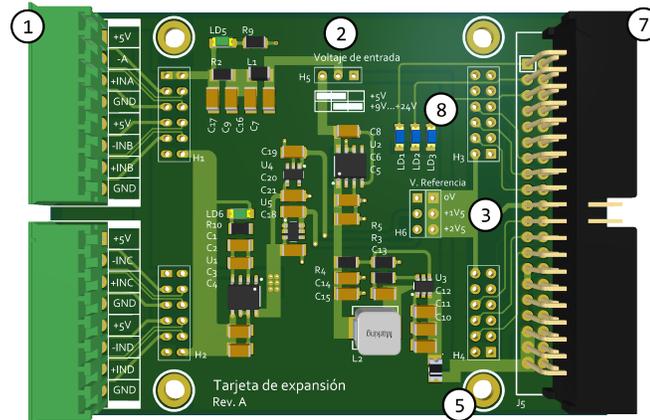
La versión *TI-E001-B* cuenta con cable y conector tipo IDE para a la conexión con tarjetas de desarrollo con FPGA o con Procesadores de Señales Digitales (DSP). Cuenta con tres indicadores que pueden ser usados con las salidas digitales del sistema de adquisición, también cuenta con la opción de soldar 4 conectores marca Molex para poder conectar hasta 8 termistores de coeficiente negativo (NTC), esto en dado caso de que se requiera monitorear la temperatura en varios puntos del dispositivo.

La versión **4BNC-TI-E001-B** que cuenta con 4 conectores BNC, lo que permite una conexión directa con osciloscopios o con sistemas de adquisición comerciales. Ésta cuenta con 6 salidas analógicas, de las cuales 4 son unipolares y 2 son bipolares, lo que lo hace compatible con una amplia gama de dispositivos de adquisición de señales.

En la Figura 4.14 es posible observar el modelo 3D de ambas versiones de la tarjeta de distribución.



(a) Versión 1: 4BNC-TI-E001-B



(b) Versión 2: TI-E001-B

Figura 4.14: Versiones de la tarjeta electrónica de distribución.

Ambos modelos cuentan con 2 conectores tipo clip de resorte (1), para la conexión de los 2 pares de celdas de carga en cada uno y 4 orificios de 3 milímetros (5), para el montaje con postes espaciadores. Además, ambas cuentan con dos opciones de alimentación, que pueden establecidas mediante un jumper selector (2). La primera opción es alimentar mediante un voltaje fijo de 5 V; la segunda, con un voltaje que puede variar entre 9 y 24 volts. Para la versión **4BNC-TI-E001-B**, la alimentación se encuentra en el conector adicional Buchanan (4), mientras que para la versión TI-E001-B la alimentación se encuentra en el conector tipo IDE (7). El usuario decide, en función de la aplicación, que tipo de alimentación utilizar.

Este conjunto de tarjetas está pensando para su uso a nivel laboratorio, es decir, dentro de un ambiente controlado, donde el dispositivo electrónico no será sometido a pruebas ajenas a su propósito.

4.6. Diseño de pruebas

Se diseñaron experimentos controlados con el fin de probar el funcionamiento del sistema por etapas y en conjunto. A continuación, se describirá la metodología de las pruebas más importantes realizadas.

4.6.1. Tiempo de respuesta de las celdas de carga

Una parte fundamental del funcionamiento del sistema propuesto es su tiempo de respuesta, dependiente de la respuesta individual de los sensores y el mecanismo que los contiene. La reacción de los sensores ante un estímulo externo debe ser lo suficientemente rápida para lograr captar el rango de frecuencias en las que opera el herramental propulsado por el husillo de una máquina CNC estándar, además de los armónicos producidos.

En primera instancia, para corroborar este requerimiento, se planteó probar el tiempo de respuesta de cada celda por sí sola. La prueba consistió en realizar un golpe directo a cada celda de carga con un sensor de respuesta conocida, para posteriormente comparar la respuesta de este sensor con la de la celda.

La prueba fue realizada con un martillo de impacto. Dicha herramienta posee un sensor integral de fuerza montado en el extremo de contacto de un martillo de masa conocida. Este sensor piezoeléctrico convierte la fuerza del golpe en una señal eléctrica, la cual puede ser adquirida y analizada. Se buscó obtener con esto una estimación del tiempo de respuesta al realizar esta comparación a través de la resta del tiempo entre respuestas, expresado en la siguiente ecuación:

$$T_r = T_c - T_m \quad (4.18)$$

Donde T_r es el tiempo de respuesta real (estimado), T_c es el tiempo absoluto de la señal de la celda de carga y T_m es el tiempo absoluto del sensor piezoeléctrico (martillo). Se espera que la celda de carga tenga un tiempo de reacción más grande que el martillo.

Para un correcto funcionamiento del sistema, el tiempo de respuesta real T_r debe ser menor al tiempo de respuesta mínimo $T_{r_{min}}$, dado por el recíproco de la frecuencia máxima $F_{max} = 6000$ Hz; esto último es: $T_{r_{min}} = \frac{1}{F_{max}} = \frac{1}{6000} = 166.67 \mu s$.

De esta manera, el tiempo de respuesta real debe ser:

$$T_r < T_{r_{min}} \quad (4.19)$$

Así, será posible detectar los impulsos más rápidos dentro del rango propuesto.

La prueba se realizó sobre las cuatro celdas de carga del dispositivo, repitiendo el proceso 5 veces por cada sensor, a fin de obtener repetibilidad y realizar un promedio, obteniendo así una mejor estimación del tiempo de respuesta específico de cada celda. Se utilizó un martillo de impacto PCB Piezotronics 086C03, con un preamplificador Vallen Systeme AEP5 y una caja de desacoplamiento Vallen Systeme DCPL. Las señales de voltaje fueron adquiridas por un osciloscopio y exportadas a un archivo de formato CSV.

La Figura 4.15 muestra la configuración de la prueba de impacto sobre la celda de carga.

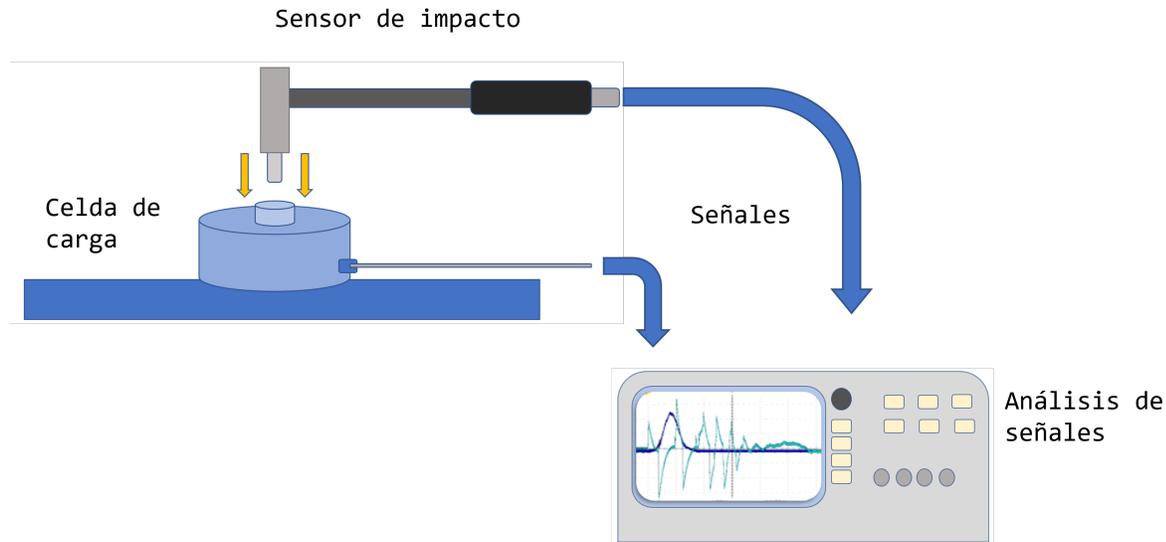


Figura 4.15: Diagrama de prueba de impacto

Es necesario realizar la prueba de impacto en repetidas ocasiones sobre cada celda para poder obtener un promedio y una medición aproximada del error, lo cual es de ayuda en el conocimiento de los límites de dispositivo, es por esto que los datos obtenidos a partir de las señales en el osciloscopio fueron analizados mediante el uso de Matlab, donde se analizó la forma de las señales, identificando los impulsos correspondientes a cada sensor. Con el software se encontraron los valores de tiempo que registró cada pico en las señales. Con estos valores es posible hacer el cálculo de los tiempos de respuesta con la ecuación 4.19.

Para calcular el error, se empleó el promedio obtenido de las 5 pruebas sobre cada celda. La diferencia entre el valor promedio y el registrado es el error absoluto, este valor fue calculado a través de la siguiente expresión:

$$\varepsilon_a = \frac{\sum_{i=1}^n |\bar{X} - X_i|}{n} \quad (4.20)$$

El error relativo es la representación en términos de porcentaje del error. Éste se obtuvo a través de la siguiente ecuación:

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon_a}{\bar{X}} \quad (4.21)$$

Finalmente, los resultados de las pruebas fueron presentados en un gráfico de dispersión con sus respectivas barras de error para visualizar la variabilidad y la incertidumbre de cada una de las pruebas realizadas.

4.6.2. Prueba con carga en desbalanceo

Se ejecutó una prueba para verificar la correspondencia entre las señales de las celdas de carga de un mismo eje. La prueba se realizó sobre la etapa mecánica en su versión 3 y los sensores de fuerza colineales a la fuerza aplicada, buscándose generar una reacción de igual magnitud pero sentido opuesto. Se montó una galga extensiométrica Rhino 100 kg sobre la etapa mecánica, fungiendo como el sensor de comparación. Se le aplicó a esta una fuerza variante en el tiempo mediante una masa rotativa en desbalanceo controlada por un motor de corriente directa. A continuación, la Figura 4.16 muestra la configuración de esta prueba.

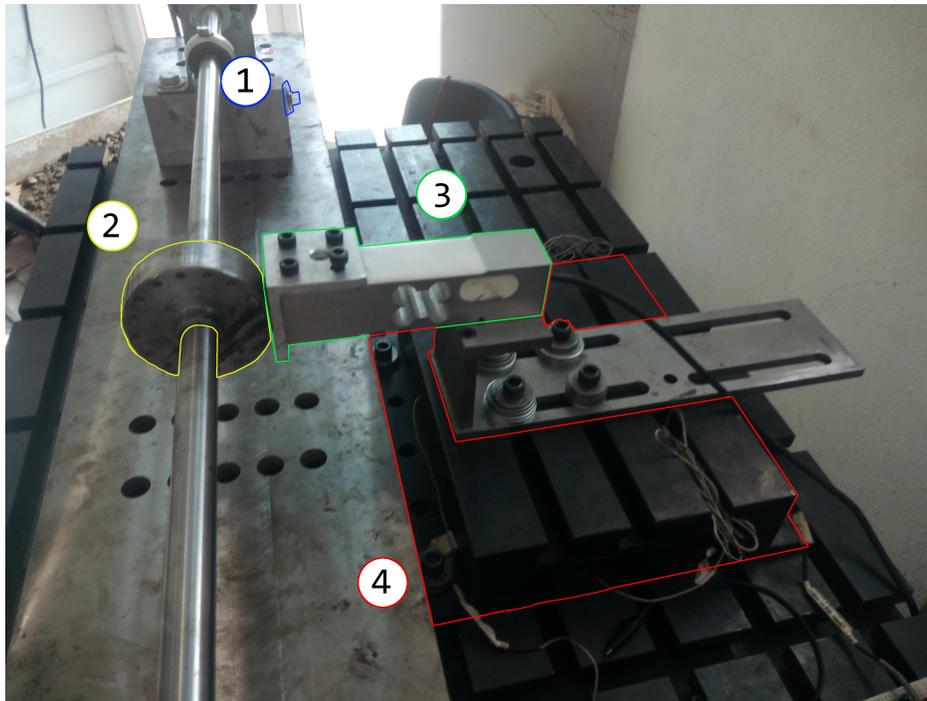


Figura 4.16: Configuración de la prueba de desbalanceo

1. Acelerómetro izquierdo (acel. derecho no en la figura)
2. Carga en desbalanceo
3. Galga Rhino 100 kg
4. Sistema mecánico

El motor tiene una velocidad de giro nominal de 62 RPM con una caja de engranes de relación 40 : 1. Puesto que no fue adaptada al motor, la velocidad nominal del motor fue de $62 \times 40 = 2480$

RPM. La masa en desbalance realiza un impacto en cada revolución del motor, simulando el comportamiento de las fuerzas presentes en un entorno de remoción de material de manera controlada. Como ya fue mencionado, únicamente se adquirió la señal de las celdas de carga colineales a la fuerza aplicada, posicionadas en el eje Y del sistema. Adicionalmente, se instalaron acelerómetros en las chumaceras del eje que sostiene la masa en desbalance.

La amplificación de las señales provenientes de los sensores se realizó con dos amplificadores operacionales de instrumentación INA129P, con una ganancia de 1000. Las señales amplificadas fueron transmitidas a una tarjeta de adquisición USB X Series 6366 2 MS/s de National Instruments, a una tasa de mil muestras por segundo.

Los datos obtenidos fueron procesados mediante scripts de Matlab. Se realizó un filtrado y se calculó la Transformada Rápida de Fourier (FFT, por sus siglas en inglés), obteniéndose el espectro de frecuencia. Con esta gráfica fue posible localizar por inspección las frecuencias fundamentales.

Se realizaron cambios en las variables y en los elementos de la prueba, con el fin de observar el comportamiento del sistema en distintas situaciones:

- Se realizó un barrido de voltajes de alimentación del motor, de menor a mayor, y de mayor a menor. Cada voltaje fue sostenido por unos segundos para registrar su efecto.
- Se colocó una masa adicional a la carga desbalanceada, logrando un desbalance mayor. El motor se mantuvo a un voltaje constante, menor al nominal, por lo que se esperó una velocidad y, por lo tanto, frecuencia, menor a 2480 RPM.
- Se realizó una prueba de barrido similar a la primera, pero incluyendo la medición de un vibrómetro láser Polytec PDV 100 sobre la carga desbalanceada, tal como se muestra en la Figura [4.17](#).

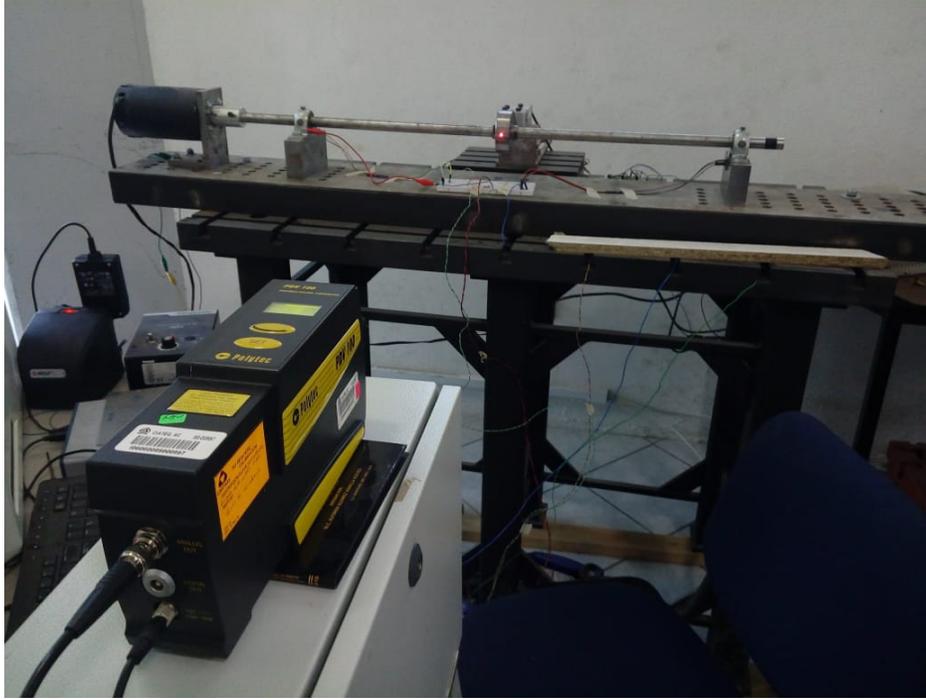


Figura 4.17: Prueba de desbalanceo con vibrómetro láser Polytec PDV 100

4.6.3. Prueba con dispositivo de vibración

La última prueba consiste en la evaluación del sistema de estimación de fuerzas completo; esta vez, con la etapa mecánica en su versión 4. Se busca validar la afectación por interferencia cruzada, la operación general sistema ante condiciones de vibración y la respuesta; especialmente, en búsqueda de puntos de resonancia y atenuación. Se propuso realizar un barrido de la frecuencia en décadas, tomando en cuenta el rango de operación propuesto para el sistema y el rango de operación del dispositivo de vibración: 2, 3, 4, ... 10, 20, 30, ... 100, 200, 300, ..., 1000 y 2000 Hz. Se busca obtener muestras significativas del comportamiento, realizando pruebas a ambos ejes, longitudinal y transversal.

El dispositivo utilizado para la prueba es un sistema de pruebas de vibración TIRA TV 51144-IN. Este dispositivo se conforma por un amplificador, un ventilador y un barril excitador de vibraciones. El amplificador de potencia TIRA BAA 1000 recibe una señal de voltaje externa, que puede ser obtenida de un generador de funciones, y la amplifica, alimentando el barril S 51144-IN. A su vez, el vástago roscado del barril realiza un movimiento lineal correspondiente a la señal recibida. El ventilador genera un flujo constante de aire hacia el barril para prevenir el sobrecalentamiento.

El sistema de pruebas de vibración es capaz de operar en un rango de entre 2 y 2 kHz, suficiente para validar el funcionamiento del sistema del presente documento. Se introdujo esta vibración en forma de onda senoidal mediante un generador de funciones. Es de importancia notar que el sistema TIRAvib no controla la fuerza con la que aplica la vibración, sino la frecuencia y la forma de la onda, obteniendo así una forma senoidal pura [70], [71].

Para sujetar el sistema TIRA a la etapa mecánica, se diseñó una pieza de acoplamiento. Se dotó a la pieza de agujeros roscados para la unión con el vástago del barril y agujeros para la sujeción a la mesa de fuerzas. A continuación, la Figura 4.18 muestra los planos de fabricación de esta pieza.

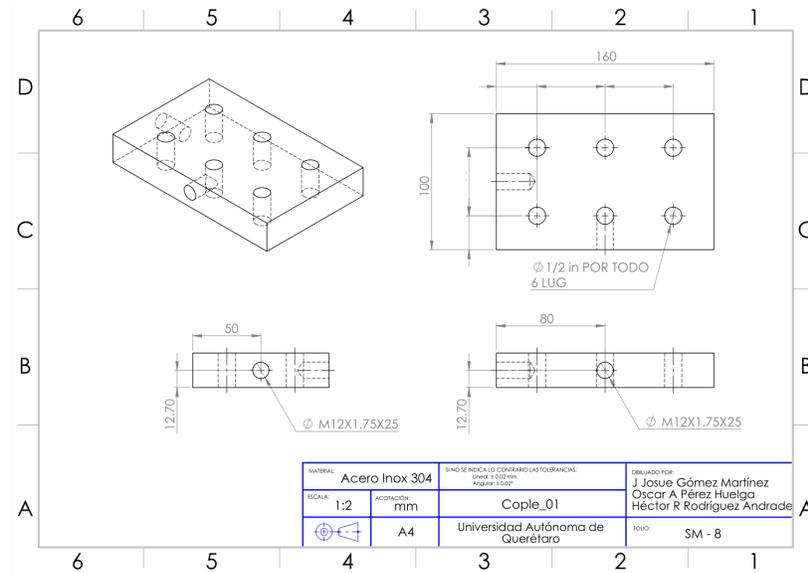


Figura 4.18: Plano de fabricación de la pieza de acoplamiento para prueba de vibración

Como ya fue mencionado, la prueba se realizó en ambos ejes de la etapa mecánica con el objetivo de observar las afectaciones por interferencia cruzada; tomando en cuenta esto, se instalaron las 4 celdas de carga. Las señales de voltaje fueron adquiridas por la etapa de instrumentación conformada por las tarjetas electrónicas diseñadas. Las señales fueron finalmente desplegadas en un osciloscopio y almacenadas en un archivo .CSV.

A continuación, la Figura 4.19 muestra un modelo de la configuración de la prueba propuesta:

Se le aplicó la Transformada Rápida de Fourier a los datos obtenidos durante las pruebas, obteniendo los espectros de frecuencia individuales de cada celda, sobre cada frecuencia de excitación. De esta manera, fue posible realizar un diagrama de Bode de magnitud y fase que representa el comportamiento del sistema en el rango de frecuencia de operación.

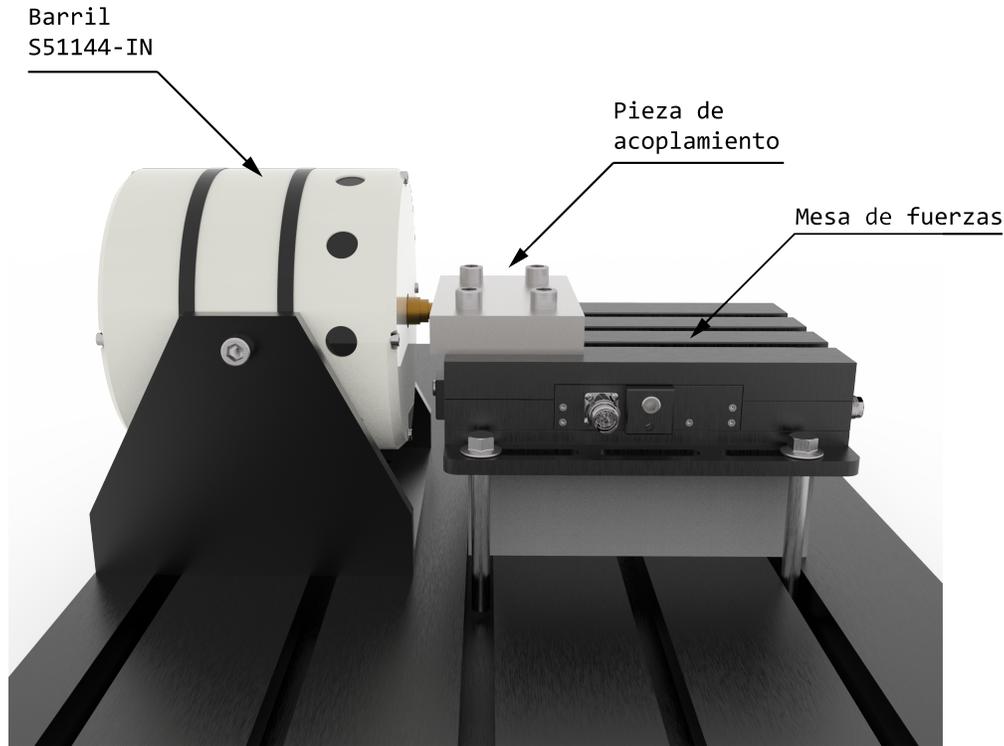


Figura 4.19: Configuración de la prueba de vibración

4.6.4. Estimación de interferencia cruzada (*Crosstalk*)

Para realizar una estimación de la interferencia cruzada se llevaron a cabo una serie de pruebas en las que se aplicó una fuerza sobre ambos ejes del sistema, monitoreando los sensores del eje de aplicación y del eje perpendicular, donde la interferencia se manifestó. La fuerza ejercida se mantuvo dentro del rango de medición de los sensores.

Se realizó una prueba de impacto con un martillo de goma y un elemento para la transmisión de la fuerza hacia el sistema, buscando que la dirección de aplicación se mantuviera en línea con el eje. La Figura 4.20 muestra la configuración propuesta de la prueba.

Las salidas de los cuatro sensores fueron adquiridas en paralelo para hacer coincidir la reacción de todas ante el estímulo. La prueba se efectuó tanto en dirección del eje X como en dirección del eje Y. Finalmente, la interpretación de los datos se realizó a través de la proporción entre las magnitudes de las señales registradas. Así, el valor de la interferencia será equivalente a la razón de la señal perpendicular al eje de aplicación y la señal en línea con el eje de aplicación. La ecuación 4.22 muestra como se da esta relación.

$$Crosstalk_x = \frac{Output_y}{Output_x} \quad (4.22)$$

$$Crosstalk_y = \frac{Output_x}{Output_y} \quad (4.23)$$

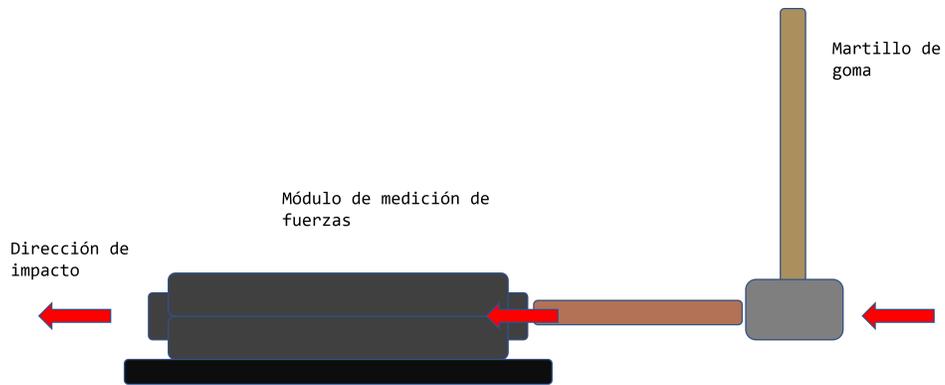


Figura 4.20: Diagrama de la prueba de estimación de la interferencia cruzada.

Donde $Crosstalk_x$ es la proporción del crosstalk sobre el eje X y $Crosstalk_y$ es la proporción en Y . $Output_x$ y $Output_y$ representan la señales de salida de los sensores provistos en el eje X y Y respectivamente.

Resultados y Discusión

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos del desarrollo de esta tesis. Se discutirán los resultados del proceso de diseño conceptual, la ingeniería de detalle y las pruebas de validación realizadas. Se presentará el impacto que tuvo la planeación sobre el producto final y las modificaciones necesarias para continuar con la validación.

5.1. Diseño del dispositivo

Se manufacturó y ensambló la propuesta del sistema de medición de fuerza presentada en la Sección 4. A continuación se expondrá con detalle el trabajo realizado para completar las etapas del sistema.

5.1.1. Etapas del sistema de medición

Con base en los planos de trabajo presentados en la metodología se realizó la manufactura del sistema mecánico. La versión 3 fue producida en un taller de maquinados cercano a las instalaciones de la Universidad Autónoma de Querétaro, llamado Servicio de Mantenimiento a Equipo Dinámico S.A. de C.V. (SEMEDI). Se realizó un seguimiento continuo del proceso para asegurar el cumplimiento de las especificaciones solicitadas y para recibir retroalimentación del personal especializado en los procesos de manufactura. A continuación, la Figura 5.1 presenta el proceso de fabricación en una etapa avanzada.

Al terminar el proceso de fabricación de esta versión, se realizaron ajustes a las dimensiones de las tapas, mejorando el ensamble de las celdas de carga y de las tapas al resto del mecanismo. Asimismo, todos los elementos externos fueron sometidos a un proceso de pavonado, el cual es una operación química superficial de protección que produce un recubrimiento de color negro evitando la corrosión y mejora el aspecto de las piezas. A continuación, se presenta una fotografía de la versión 3 terminada: Figura 5.2.

Después de la fabricación del mecanismo, se integraron ajustes adicionales en algunos elementos del mismo, con el fin de mejorar el ensamble y funcionamiento. Para el proceso de precarga de los sensores, se colocaron lanas de aluminio en la cavidad de las tapas donde son colocadas las



(a) Elementos individuales del mecanismo.



(b) Sistema mecánico ensamblado.

Figura 5.1: Proceso de manufactura de la etapa mecánica versión 3.



Figura 5.2: Versión 3 del sistema mecánico.

celdas de carga. También se realizó un calzado similar a las colas de milano, con el fin de ajustar la distancia de estas piezas con los niveles del mecanismo y poder reducir la fricción existente. Por otro lado, se engrasaron todos los elementos que poseen movimiento, contribuyendo a este mismo fin.

Tras validar la etapa mecánica y los sensores durante la prueba con carga en desbalanceo, se buscó mejorar el funcionamiento de éstas. Como fue descrito en la sección [4.5.1](#), se diseñaron modificaciones mecánicas a la versión 3, obteniéndose como resultado la versión 4. Se manufacturaron tapas nuevas (Figura [5.3a](#)), contemplando la adición de un mecanismo de precarga dedicado y conectores industriales para las señales de voltaje procedentes de las celdas de carga, así como de los termistores (Figura [5.3b](#)), también integrados en esta versión.



(a) Tapa versión 3 (izq.); tapa versión 4 (der.)



(b) Integración de termistores

Figura 5.3: Adición de mejoras a la etapa mecánica



Figura 5.4: Versión 3 del sistema mecánico.

Durante la preparación de la prueba con el dispositivo de vibración, un error de diseño en el mecanismo de precarga de los sensores desembocó en la rotura del cable de la celda #3. A raíz de este incidente, se implementó una modificación de bajo costo sobre las tapas, evitando que el problema se presentara de nuevo. La celda dañada fue reemplazada por una nueva, con convención #5.

5.1.2. Tarjetas electrónicas

Bajo a las especificaciones de diseño propuestas en las Secciones [4.5.3](#) y [4.5.3](#), se gestionó la fabricación de los diferentes modelos de tarjetas electrónicas, la tarjeta de instrumentación y las dos tarjetas de distribución. El ensamblaje fue realizado de forma manual con soldadura en rollo y un cautín de estación. A continuación, se puede observar una serie de fotografías de las tarjetas finalizadas.

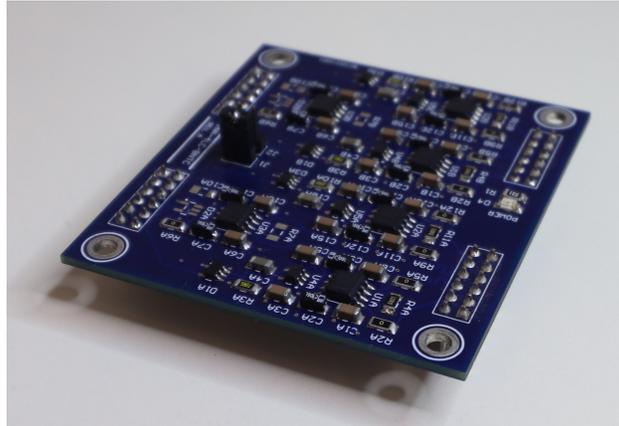
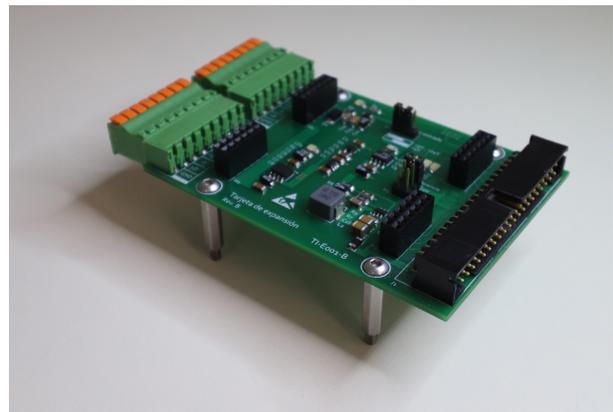


Figura 5.5: Fotografía de la tarjeta de instrumentación INA-4LC-8NTC.

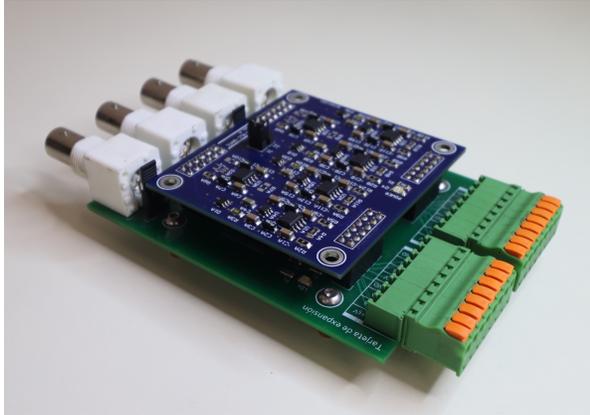


(a) Tarjeta 4BNC-TI-E001-B.

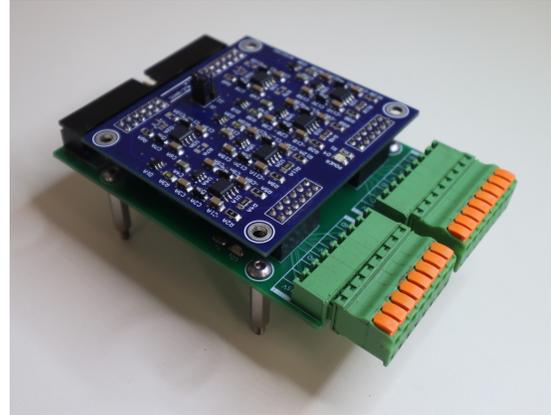


(b) Tarjeta TI-E001-B.

Figura 5.6: Fotografías de las tarjetas de distribución.



(a) Ensamble versión #1



(b) Ensamble versión #2.

Figura 5.7: Fotografía de las tarjetas electrónicas ensambladas.

Después de montar cada una de las tarjetas electrónicas, se realizaron pruebas de validación, como lo son: continuidad, chequeo de niveles de voltaje, comprobación de los valores de los elementos pasivos y pruebas de funcionamiento del circuito en general. Tras haber realizado estas pruebas, las tarjetas estuvieron listas para ser usadas en los diferentes experimento planteados en la metodología.

5.2. Pruebas y experimentos

A continuación se presentarán los resultados de las pruebas planteadas en la metodología. Se muestran los datos, gráficos y cálculos realizados en cada una para comprobar los objetivos planteados.

5.2.1. Tiempo de respuesta de las celdas de carga

Para probar el tiempo de respuesta de las celdas de carga, se realizó la prueba con el martillo de impacto, comparándose el tiempo de respuesta del sensor de éste con el tiempo de cada celda. El cálculo del tiempo de respuesta se realizó tomando como referencia el punto más alto de la señal de cada celda y el primer impulso observable del martillo piezoeléctrico. Esto con el fin de calcular el tiempo en que tarda en llegar al valor y, en consecuencia, el tiempo en que deja de percibir el impulso debido a la fuerza. A continuación, la Figura 5.8 muestra una prueba realizada sobre la celda #1, comparada con el martillo de impacto.

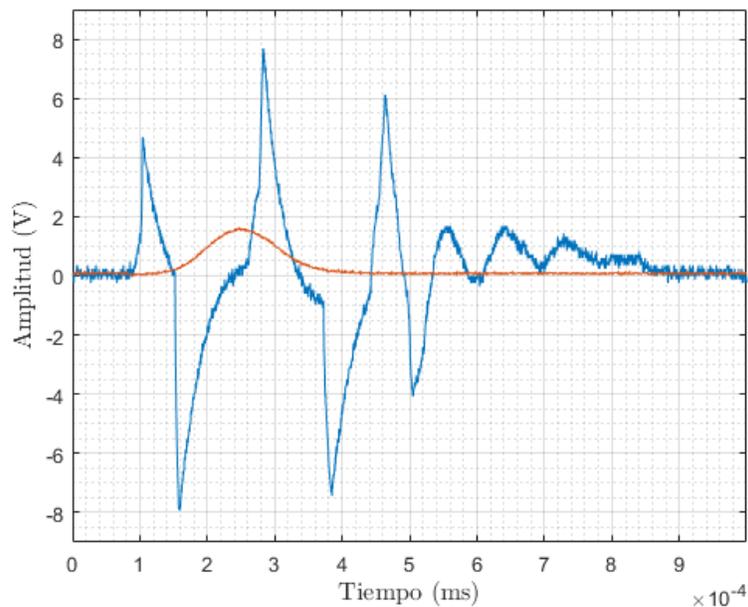


Figura 5.8: Tiempo de respuesta de celda #1. Se muestra la respuesta del martillo de impacto en azul y la celda en naranja.

Para la celda #1 se registró un tiempo de respuesta promedio de $144.48 \mu\text{s}$ con un error relativo de 2.36% , es decir, $\pm 3.4045 \mu\text{s}$. La Figura 5.9 muestra la dispersión de las mediciones registradas con sus respectivas barras de error.

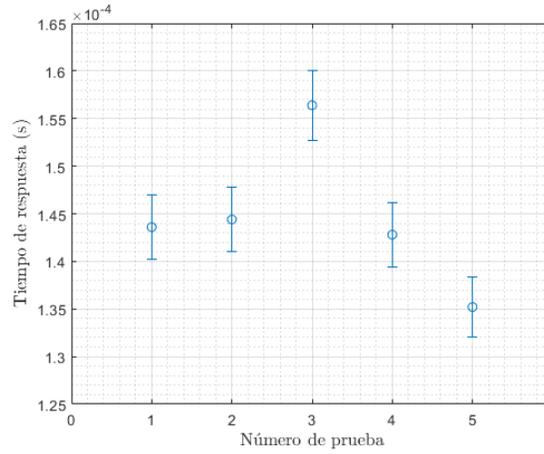


Figura 5.9: Gráfica de dispersión de celda #1

En el caso de la celda #2, el tiempo de respuesta promedio fue de $137.00 \mu\text{s}$ con un error relativo del 2.09% , es decir, $\pm 2.8622 \mu\text{s}$. La Figura 5.10 muestra la dispersión de las mediciones registradas, incluyendo las barras de error.

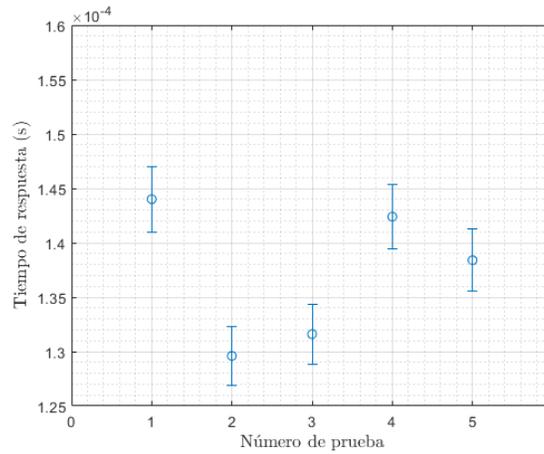


Figura 5.10: Gráfica de dispersión de celda #2

Para la celda #3, el tiempo promedio registrado de la celda fue de $144.4 \mu s$, con un error relativo de 1.32% , un valor absoluto de $\pm 1.901 \mu s$. La Figura 5.11 muestra la dispersión de las mediciones registradas con las barras de error.

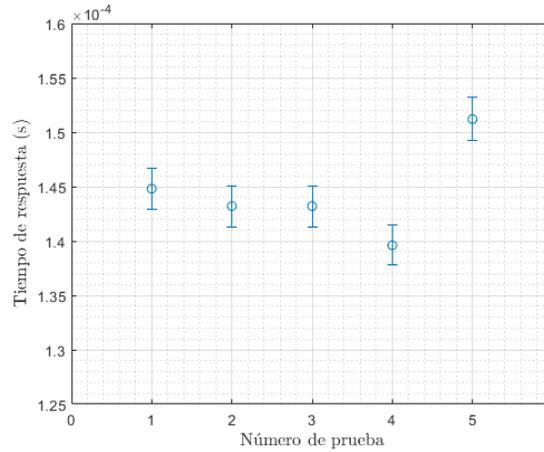


Figura 5.11: Gráfica de dispersión de celda #3

Por último, la celda #4 registró también un tiempo de respuesta promedio de $144.40 \mu s$, un error relativo de 1.76% y un error absoluto de $\pm 2.5393 \mu s$. La Figura 5.12 muestra su dispersión y sus barras de error.

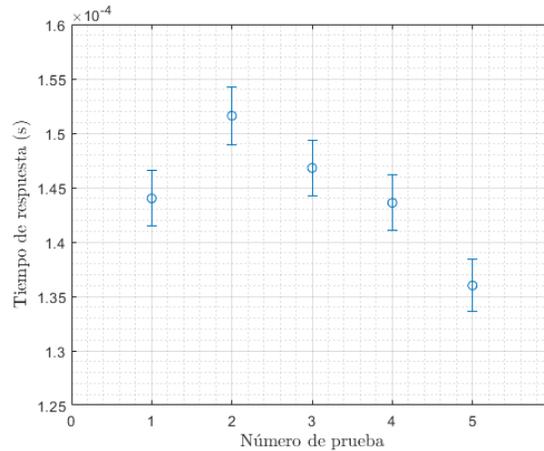


Figura 5.12: Gráfica de dispersión de celda #4

Como ya fue mencionado, el tiempo de respuesta fue referenciado al punto más alto de la señal de la celda. Tomando esto en cuenta, el periodo de tiempo en el que la celda percibe realmente el impulso completo será el doble del tiempo de respuesta medido, puesto que existe un tiempo igual al de subida para que la celda regrese a su valor inicial (descarga). A continuación se resumen los datos obtenidos de las celdas; se muestra el tiempo de subida promedio, el error relativo y el tiempo real de reacción.

Tabla 5.1: Tiempo de respuesta de las celdas de carga.

Celda #	t_{subida} (μs)	$e_{relativo}$ (μs)	$t_{respuesta}$ (μs)
1	144.48	± 3.40	288.96
2	137.00	± 2.86	274.00
3	144.40	± 1.90	288.80
4	144.40	± 2.54	288.80

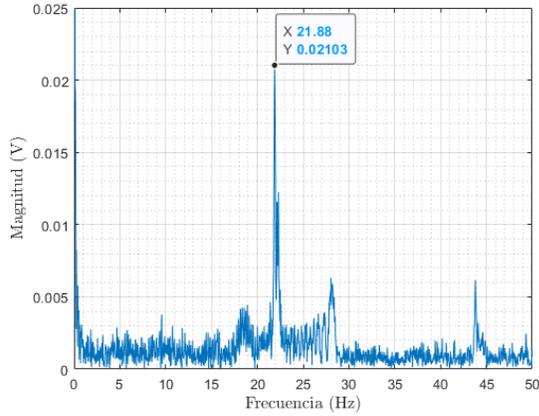
Considerando que el tiempo de respuesta promedio mayor fue de $144.48 \mu s$, la respuesta completa al impulso t_r es de $288.8 \mu s$. Con estos resultados es posible estimar la respuesta en frecuencia de las celdas de carga, la cual está dada por la ecuación [5.1](#):

$$R_{fr} = \frac{1}{t_r} \quad (5.1)$$

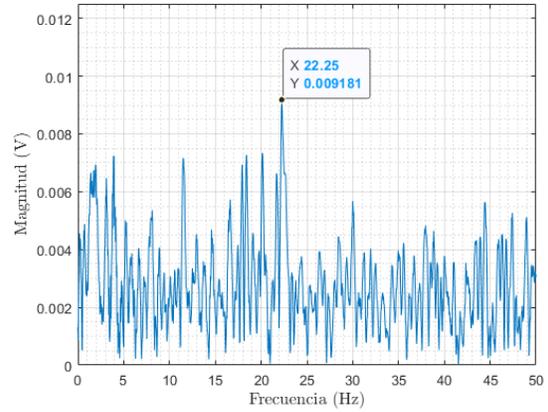
El valor obtenido es de 3462.6 Hz , teniendo esto en cuenta, con las celdas de carga seleccionadas es posible monitorear herramientas de corte de 4 gavilanes con una velocidad de hasta $10,000 \text{ RPM}$, sin embargo, sólo es posible alcanzar el armónico 5, no el 9, como se propuso en la metodología. Es posible alcanzar el armónico 9 reduciendo la velocidad del husillo de 6000 RPM . Para un mayor rango de velocidad, sería necesario integrar un sensor con mejor tiempo de respuesta, en este sentido, los sensores piezoeléctricos presentan una área de oportunidad de mejora para el dispositivo.

5.2.2. Prueba con carga en desbalanceo

Para la prueba con carga en desbalanceo, se realizó la experimentación tal como se describe en la sección 4.6.2 de la Metodología. Tras la experimentación, se aplicó la transformada rápida de Fourier (FFT) a los datos generados por cada uno de los sensores utilizados. En la Figura 5.13a y Figura 5.13b es posible observar los espectros de frecuencia de la galga extensiométrica y del vibrómetro láser, respectivamente. En ambos se puede notar que la frecuencia fundamental se encuentra entre 21.88 Hz y 22.25 Hz.



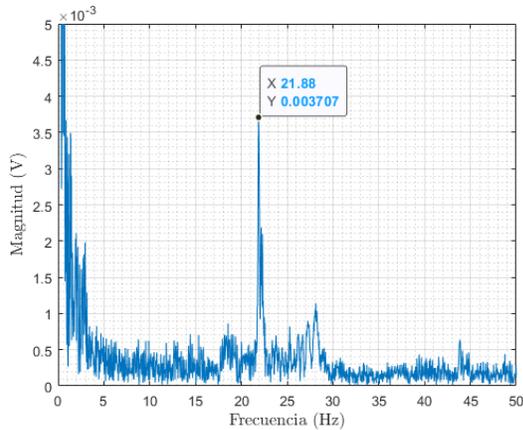
(a) Espectro de frecuencia galga extensiométrica.



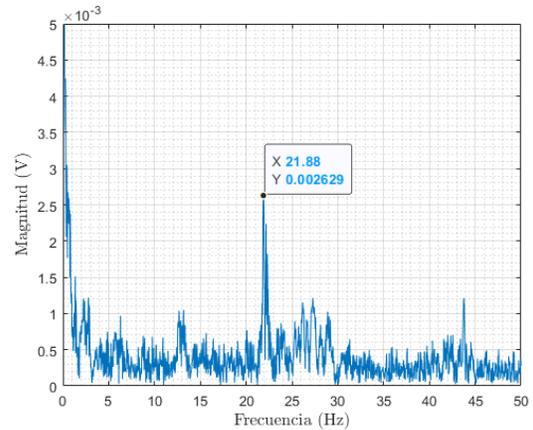
(b) Espectro de frecuencia vibrómetro láser.

Figura 5.13: Espectros de frecuencia obtenidos para galga y vibrómetro láser.

De igual manera, en la Figura 5.14 se muestran los espectros de frecuencia del par de acelerómetros utilizados en esta prueba. Para ambos, la frecuencia fundamental se encuentra en 21.88 Hz.



(a) Espectro de frecuencia acelerómetro #1.

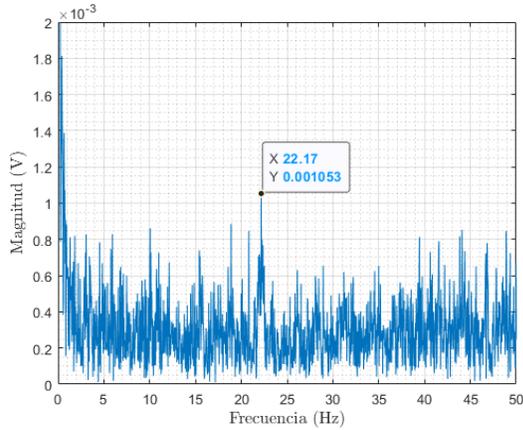


(b) Espectro de frecuencia acelerómetro #2.

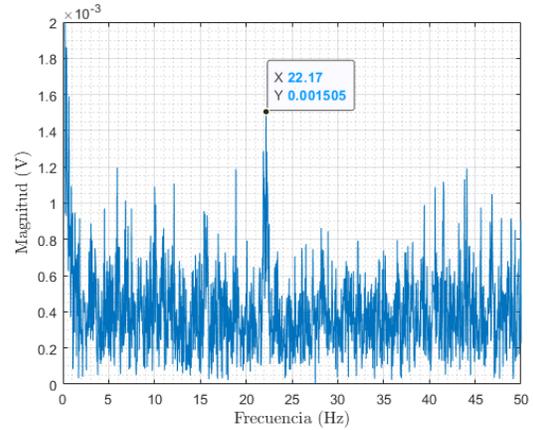
Figura 5.14: Espectros de frecuencia obtenidos para los acelerómetros.

Por último, en la Figura 5.15 se muestran los espectros de frecuencias correspondientes a las

celdas de carga pertenecientes al eje Y del mecanismo. Para éstas, la frecuencia fundamental es de 22.17 Hz.



(a) Espectro de frecuencia celda #1.



(b) Espectro de frecuencia celda #2.

Figura 5.15: Espectros de frecuencia obtenidos para celdas de carga.

Tras comparar los resultados de los cuatro instrumentos de medición y los dos sensores del sistema se puede apreciar que la frecuencia fundamental de todos se encuentra entre 21.88 Hz y 22.25 Hz. Esto corrobora la correspondencia entre la respuesta de las celdas de carga de un mismo eje ante una fuerza aplicada en su dirección. Es importante mencionar que el objetivo de esta prueba fue comprobar el funcionamiento del dispositivo en una etapa temprana, con el mecanismo en la versión 3 de desarrollo.

5.2.3. Prueba con dispositivo de vibración

Para la prueba con el dispositivo de vibración se siguió el procedimiento de la sección [4.6.3](#) de la metodología. El montaje del experimento fue realizado en el Laboratorio de Vibraciones de la Universidad Autónoma de Querétaro, con una configuración similar a la configuración propuesta en la Figura [4.19](#). Se realizaron ajustes menores para alinear los soportes metálicos laterales y la etapa mecánica. La Figura [5.16](#) presenta el montaje final.



Figura 5.16: Prueba con dispositivo de vibración. Eje Y.

El barrido de frecuencias se realizó manteniendo el voltaje en un valor constante, sin embargo, se encontró un comportamiento peculiar debido al funcionamiento del dispositivo de vibración. Esto será analizado más adelante.

Al realizar el barrido en los valores de frecuencia propuestos se encontraron puntos de interés, por lo que estos valores fueron modificados para mayor precisión alrededor de estos puntos. Es posible encontrar la lista de frecuencias en la Tabla [C.1](#), parte de los apéndices. Se monitorearon las salidas (las cuatro celdas de carga) y la señal de entrada (esfuerzo de control que realiza el amplificador de potencia) con el fin de obtener información suficiente para generar los diagramas de Bode. A continuación se presentan los resultados de estas pruebas.

Fuerza de excitación en el eje X

A manera de ejemplo, la Figura 5.17 muestra las señales obtenidas con el módulo electrónico de desarrollo. En la Figura 5.17a se encuentran las señales pertenecientes al eje X de mecanismo, las cuales corresponden a las celdas de carga #1 y #3, ambas corresponden a la frecuencia de 315 Hz. Es posible observar cómo las señales son opuestas, debido a que mientras una celda de carga experimenta fuerza de compresión, la otra experimenta fuerza de tensión. Por otro lado, la Figura 5.17b muestra las señales obtenidas en el eje perpendicular, eje Y, que corresponden a las celdas #2 y #4. Se puede observar el mismo comportamiento pero en una amplitud menor a la del eje excitado. Esto es también un comportamiento esperado; en este eje se manifiesta la interferencia cruzada que, gracias al trabajo de ingeniería en el diseño mecánico, mantiene una amplitud menor.

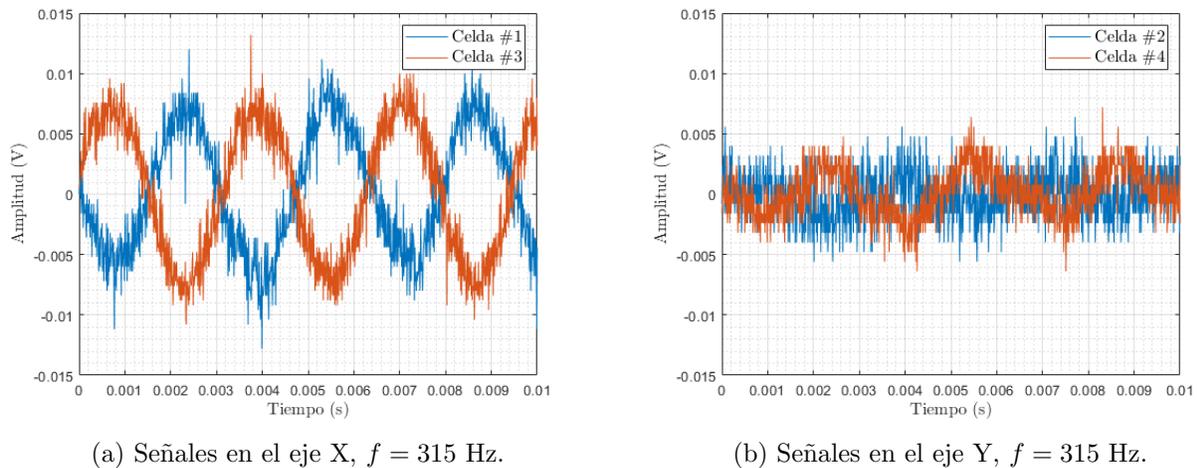
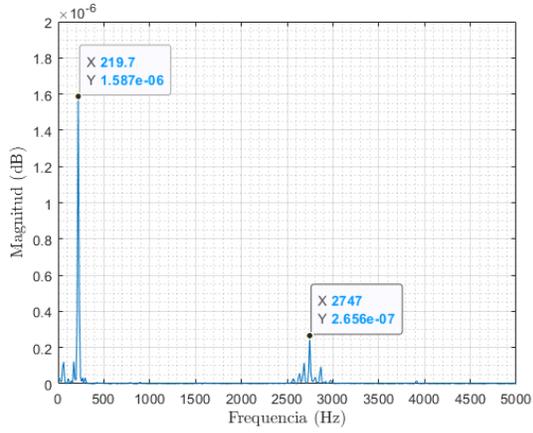
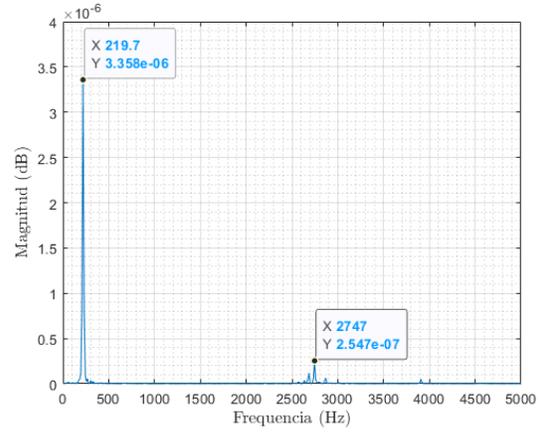


Figura 5.17: Señales obtenidas tras un excitación en el eje X, $f = 315$ Hz.

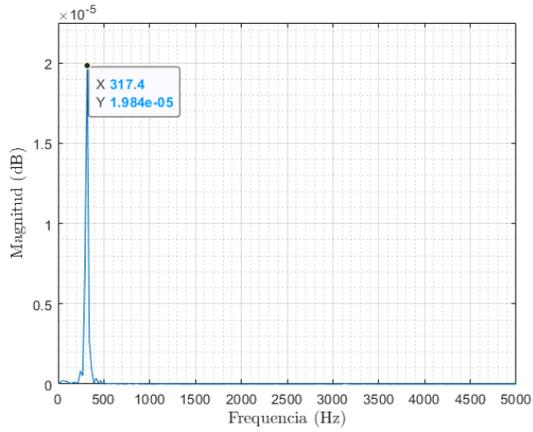
Con el conjunto de datos recolectados a partir del barrido de frecuencias, se utilizó el script de Matlab (Apéndice A.1) para obtener el espectro de frecuencia de cada una de las señales aplicadas. En la Figura 5.18 es posible observar 3 pares de gráficas del espectro de frecuencias para algunos ejemplos de frecuencias. Se seleccionaron 220 Hz, 315 Hz y 700 Hz del eje X. De manera similar, la Figura 5.19 muestra las mismas frecuencias en el eje Y, lo que corresponde a la interferencia cruzada.



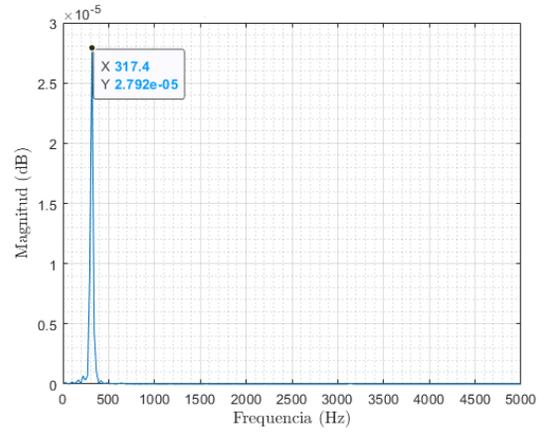
(a) Espectro de frecuencia celda #1, $f = 220$ Hz.



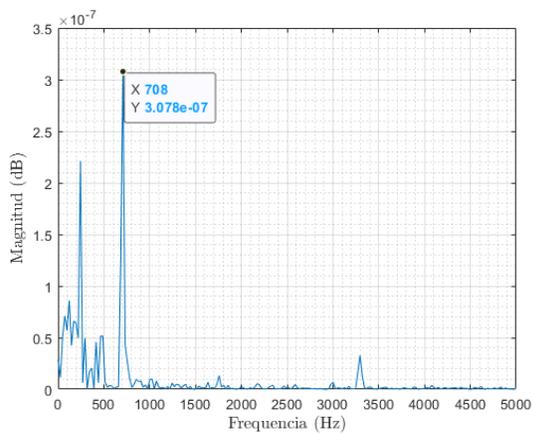
(b) Espectro de frecuencia celda #3, $f = 220$ Hz.



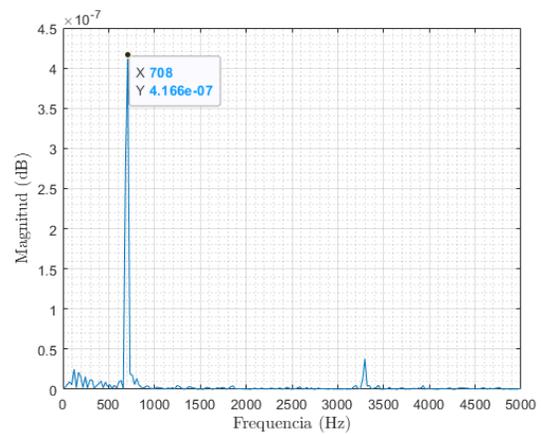
(c) Espectro de frecuencia celda #1, $f = 315$ Hz.



(d) Espectro de frecuencia celda #3, $f = 315$ Hz.

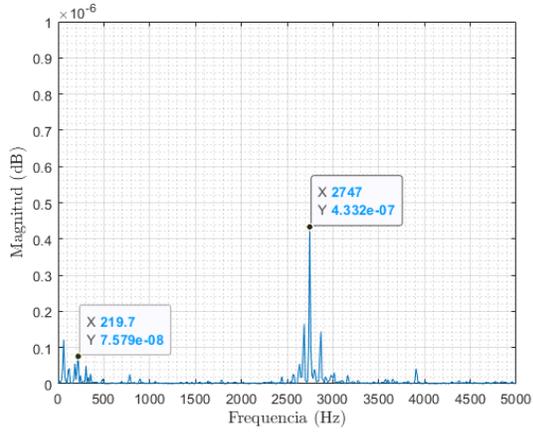


(e) Espectro de frecuencia celda #1, $f = 700$ Hz.

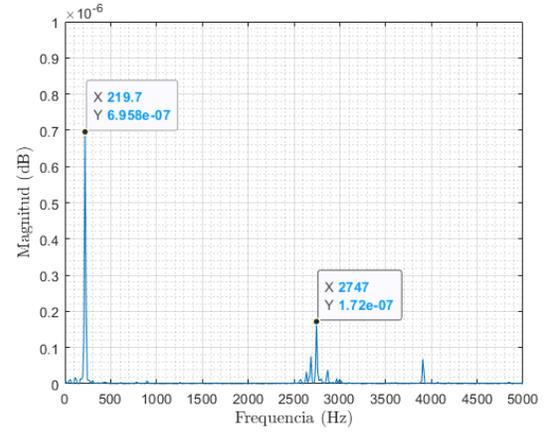


(f) Espectro de frecuencia celda #3, $f = 700$ Hz.

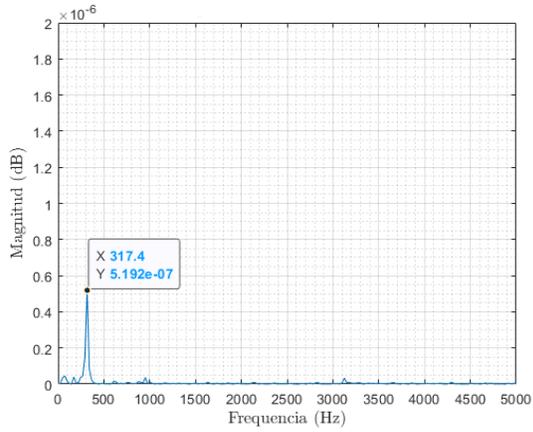
Figura 5.18: Espectros de frecuencias obtenidos en el eje X. Excitación eje X.



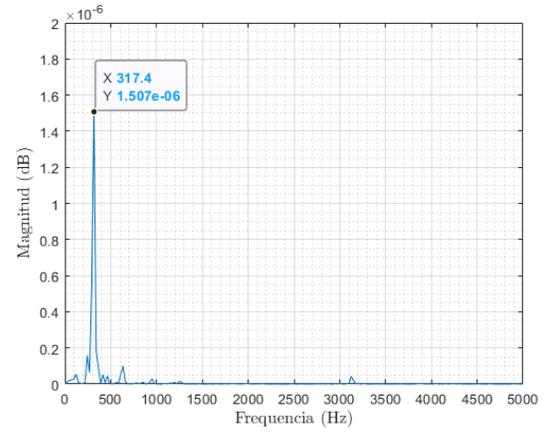
(a) Espectro de frecuencia celda #2, $f = 220$ Hz.



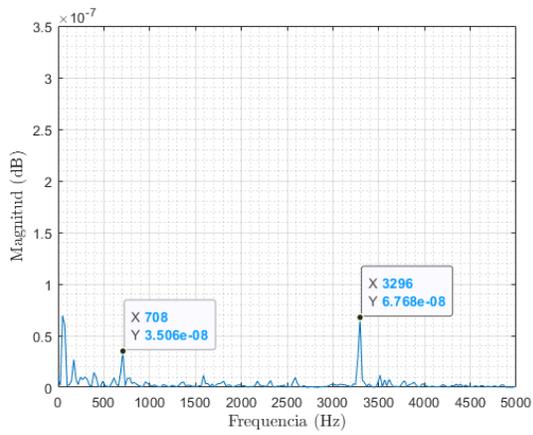
(b) Espectro de frecuencia celda #4, $f = 220$ Hz.



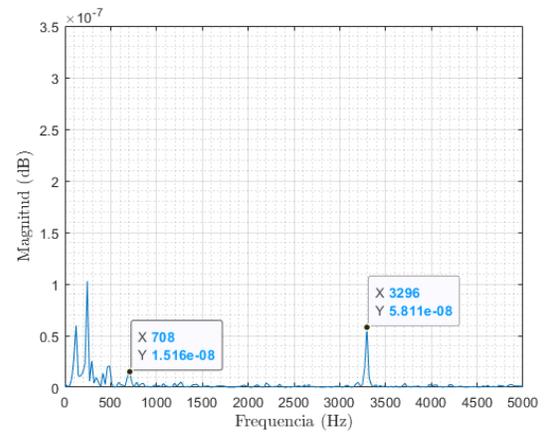
(c) Espectro de frecuencia celda #2, $f = 315$ Hz.



(d) Espectro de frecuencia celda #4, $f = 315$ Hz.



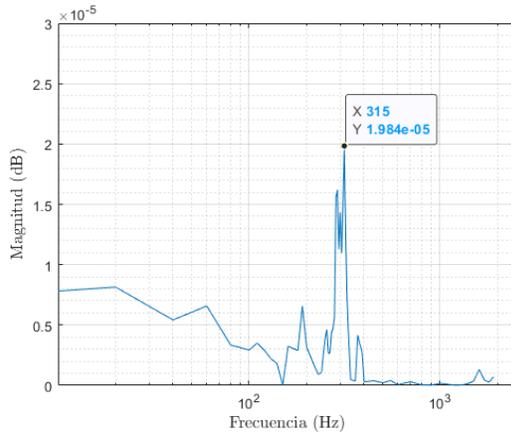
(e) Espectro de frecuencia celda #2, $f = 700$ Hz



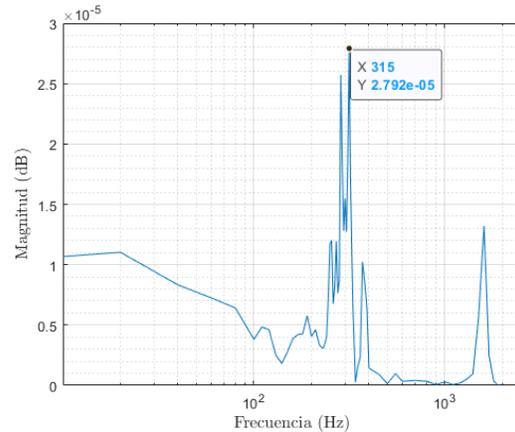
(f) Espectro de frecuencia celda #4, $f = 700$ Hz

Figura 5.19: Espectros de frecuencias obtenidos en el eje Y. Excitación eje X.

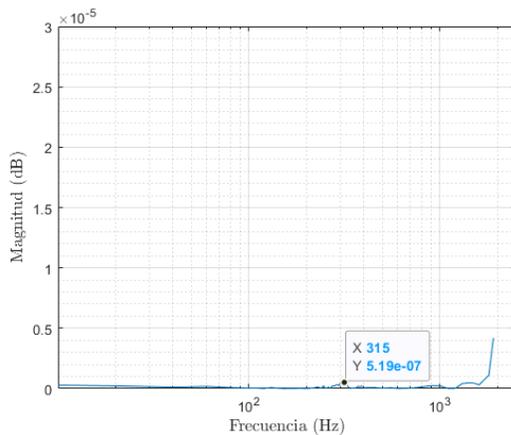
Otro script (Apéndice A.2) fue utilizado para generar el diagrama de Bode del comportamiento de cada una de las celdas a partir de los espectros de frecuencia individuales. A continuación, las Figuras 5.20a y 5.20b presentan los diagramas para cada celda. Es posible observar una fuerte relación en los espectros de las celdas del eje X, complementándose una con otra. Por otro lado, el eje Y presenta una interferencia cruzada de características similares, pero menor amplitud.



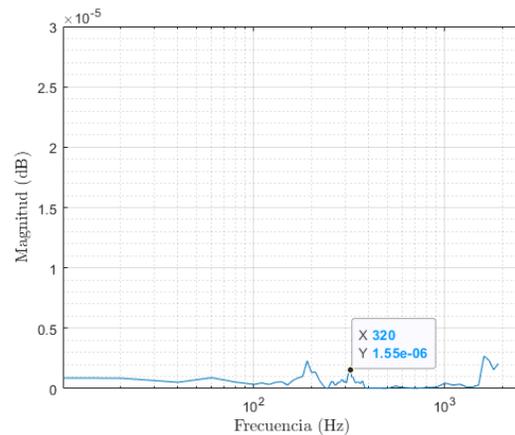
(a) Diagrama de Bode de la celda #1.



(b) Diagrama de Bode de la celda #3.



(c) Diagrama de Bode de la celda #2.



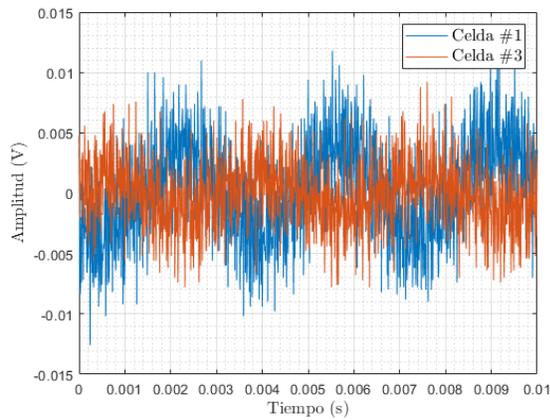
(d) Diagrama de Bode de la celda #4.

Figura 5.20: Digramas de Bode, fuerza de excitación en el eje X.

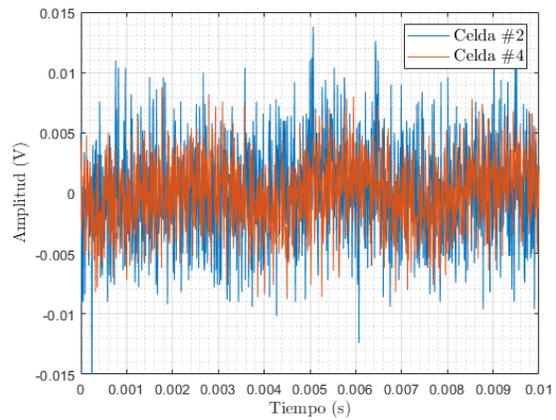
Al observar los resultados obtenidos en la Figura 5.20 es posible notar que tanto la celda #1 como la celda #3 experimentaron un pico de resonancia alrededor de $f = 315$ Hz, con una magnitud de 1.984×10^{-5} dB y 2.792×10^{-5} dB, respectivamente. Mientras que la magnitud pico de las gráficas correspondientes al eje Y es alrededor de 0.6×10^{-5} dB para la celda #2 y 0.25×10^{-5} dB para la celda #4.

Fuerza de excitación en el eje Y

Se realizó el mismo procedimiento sobre el eje Y del mecanismo, siendo el eje X aquel que presenta la interferencia. Como ejemplo de las señales obtenidas, la Figura 5.21 presenta las celdas del eje Y con una frecuencia de 290 Hz. Se presentan en la Figura 5.22 los espectros de frecuencia representativos, obtenidos del eje excitado. Por otro lado, en la Figura 5.23 se encuentran los espectros pertenecientes al eje X.

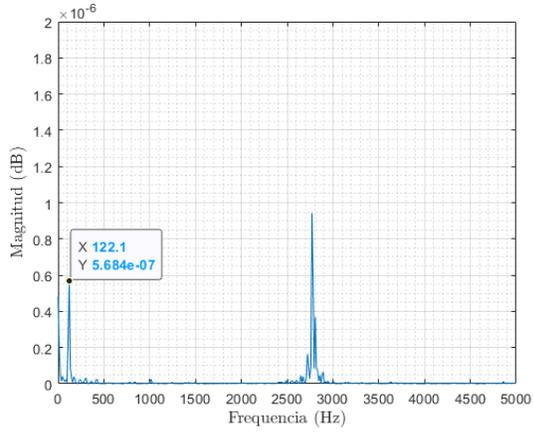


(a) Señales en el eje X, $f = 290$ Hz.

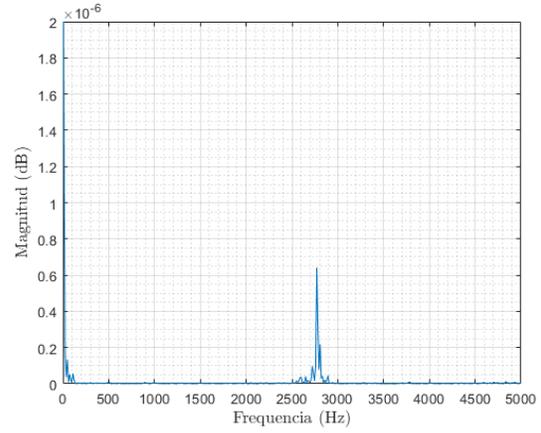


(b) Señales en el eje Y, $f = 290$ Hz.

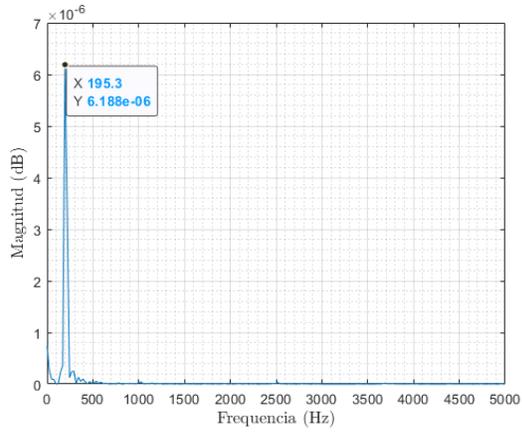
Figura 5.21: Señales obtenidas tras una excitación en el eje Y, $f = 290$ Hz.



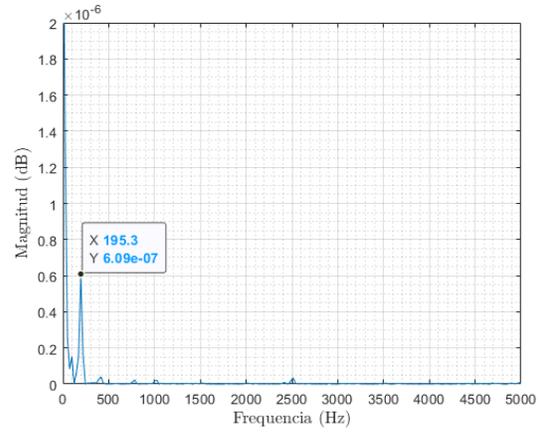
(a) Espectro de frecuencia celda #1, $f = 120$ Hz.



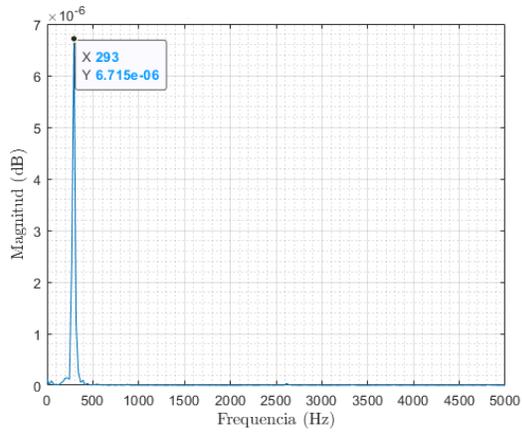
(b) Espectro de frecuencia celda #3, $f = 120$ Hz.



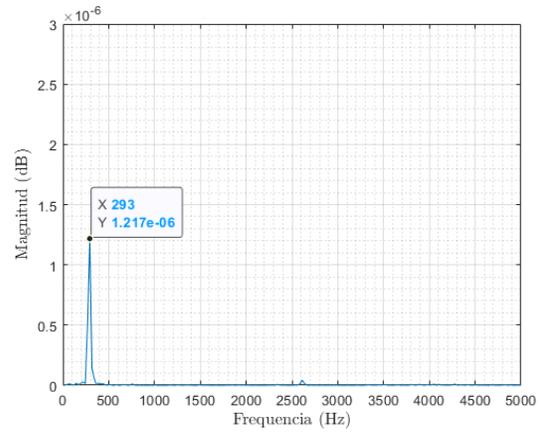
(c) Espectro de frecuencia celda #1, $f = 200$ Hz.



(d) Espectro de frecuencia celda #3, $f = 200$ Hz.

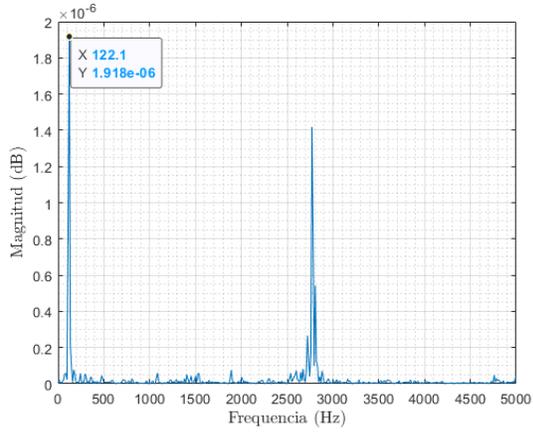


(e) Espectro de frecuencia celda #1, $f = 290$ Hz.

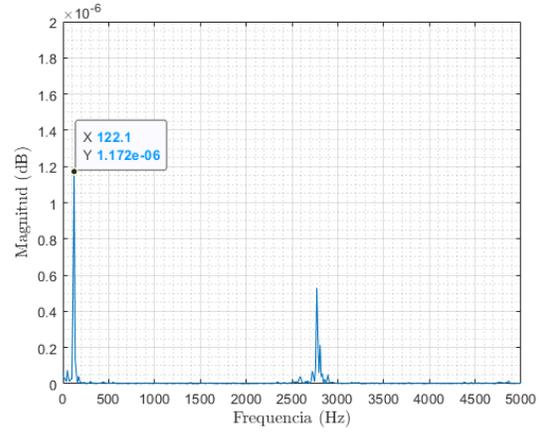


(f) Espectro de frecuencia celda #3, $f = 290$ Hz.

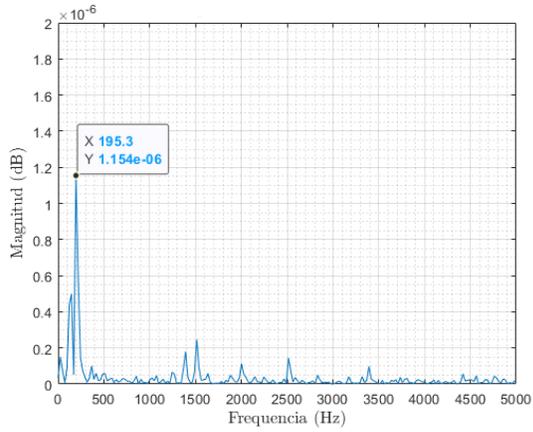
Figura 5.22: Espectros de frecuencia obtenidos en el eje X. Excitación eje Y.



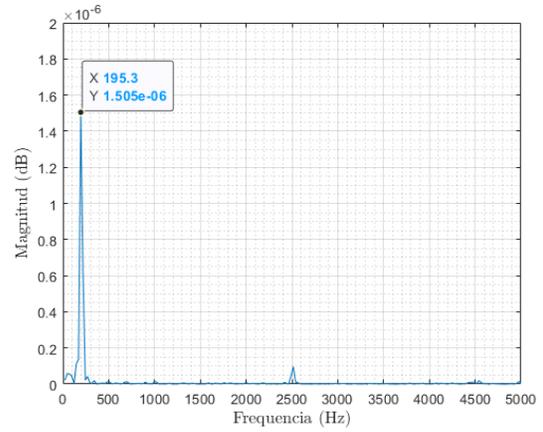
(a) Espectro de frecuencia celda #2, $f = 120$ Hz.



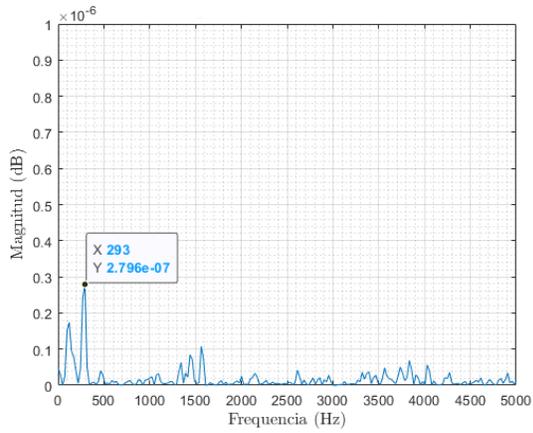
(b) Espectro de frecuencia celda #4, $f = 120$ Hz.



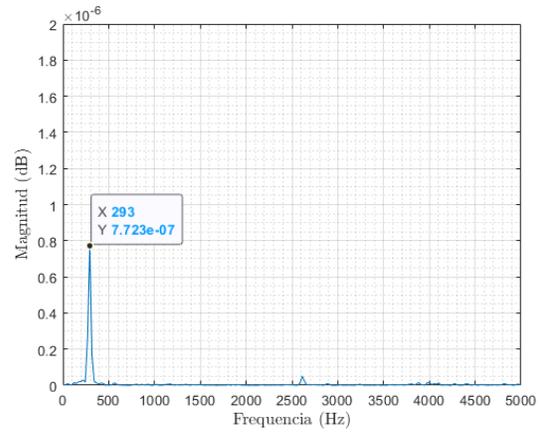
(c) Espectro de frecuencia celda #2, $f = 200$ Hz.



(d) Espectro de frecuencia celda #4, $f = 200$ Hz.

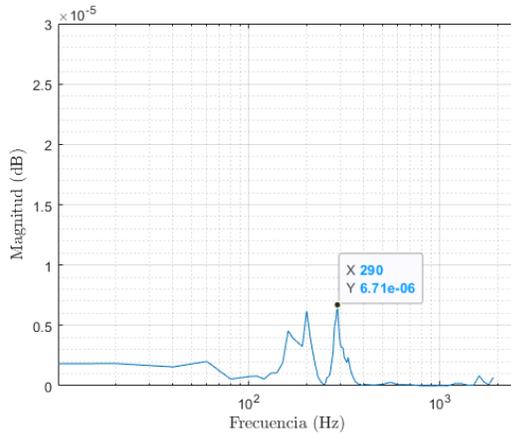


(e) Espectro de frecuencia celda #2, $f = 290$ Hz

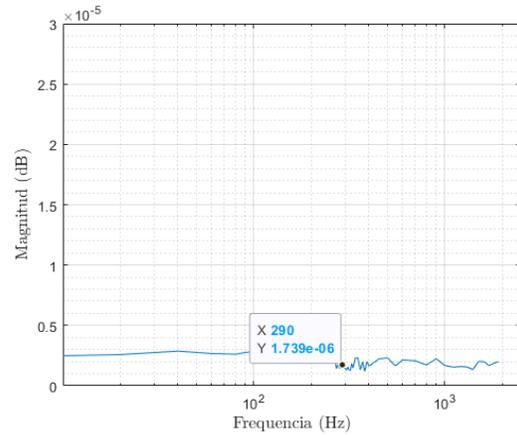


(f) Espectro de frecuencia celda #4, $f = 290$ Hz

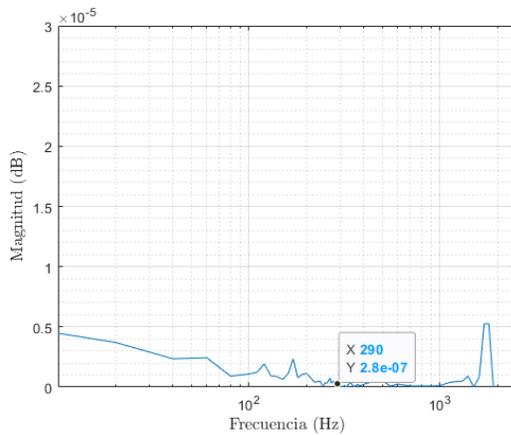
Figura 5.23: Espectros de frecuencia obtenidos en el eje Y. Excitación eje Y.



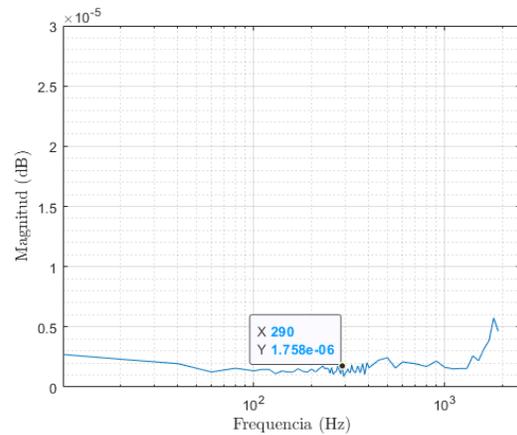
(a) Diagram de bode de la celda #1.



(b) Diagram de bode de la celda #3.



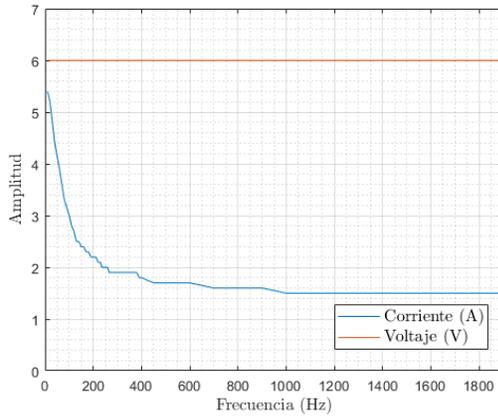
(c) Diagram de bode de la celda #2.



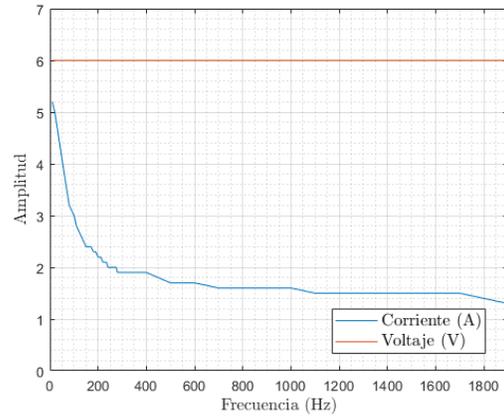
(d) Diagram de bode de la celda #4.

Figura 5.24: Digramas de Bode, fuerza de excitación en el eje Y.

Es posible observar que los datos obtenidos en este eje no son consistentes con los del eje X. Las frecuencias de resonancia encontradas se deben a que el sistema TIRAvib no controla la fuerza con la que aplica la vibración, sino la frecuencia y la forma de onda. Las pruebas demostraron que la fuerza aplicada por el sistema disminuye conforme la frecuencia aumenta, lo que lo hace más susceptible a este fenómeno. Es posible observar esto en el voltaje y la corriente generados por el amplificador. Se mantuvo un voltaje constante, pero la corriente disminuyó con frecuencias más altas. De la multiplicación de estos valores se obtiene la potencia que el amplificador genera. La Figura 5.25 muestra esta disminución de la corriente debido a la frecuencia.



(a) Potencia en el eje X.



(b) Potencia en el eje Y.

Figura 5.25: Disminución de la corriente suministrada al barril con frecuencias altas.

Por otro lado, la amplitud de las señales del eje Y no coincide con la amplitud del eje X cuando el cada uno es excitado. Esto es debido a la masa a la cual es aplicada la señal de excitación, que es menor a la del eje X. Para el eje X, es la masa de la mesa superior más la masa de la mesa intermedia, mientras que para el eje Y solo es la masa de la mesa superior, como se puede observar tanto en la Figura 4.4 como en la Figura 4.5. La masa juega un papel importante en la fuerza que detectan los sensores.

Además, La magnitud de la señal obtenida por las celdas de carga se encuentra en el orden de los 10 mV pico, lo que representa el 0.72 % del rango de medición de las celdas de carga. La señal tiene gran susceptibilidad al ruido a esta escala.

5.2.4. Prueba de estimación de interferencia cruzada

A continuación se presentan los datos obtenidos de la prueba de impacto para la estimación del nivel de interferencia cruzada en el sistema. Se empleó el método de la matriz inversa, descrito en la Sección 3.2.

La Figura 5.26 muestra las señales obtenidas con el impacto ejercido sobre el eje X.

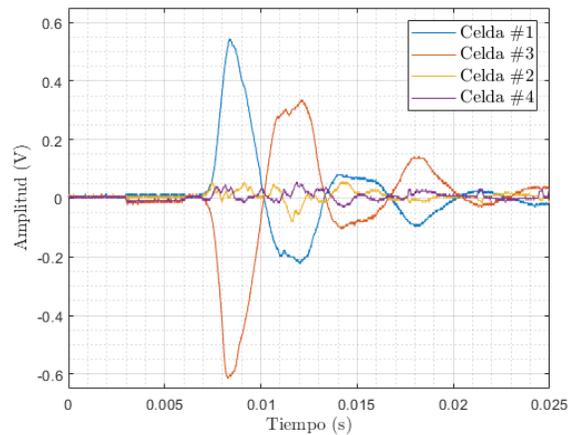


Figura 5.26: Prueba de impacto sobre el eje X

En el sensor correspondiente al eje X, el primer pico tiene una magnitud de 0.544 V, el sensor correspondiente al eje Y tiene una magnitud de 0.056 V.

La Figura 5.27 corresponde al impacto ejercido sobre el eje Y.

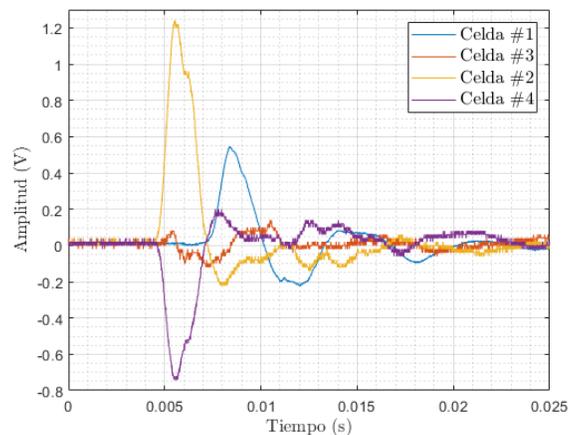


Figura 5.27: Prueba de impacto sobre el eje Y

Para esta prueba, la magnitud del primer pico de la señal del sensor, correspondiente al eje Y, es de 1.240 V. El sensor correspondiente al eje X tiene registrado una magnitud de 0.08 V.

De manera resumida, se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 5.2: Señales de salida de los sensores.

	Dirección de la fuerza	
	X	Y
Output X	0.544	0.056
Output Y	0.080	1.240

Con esta información es posible calcular el nivel de interferencia cruzada presente en cada eje. Dividiendo las señales de salida de los sensores entre la mayor de dichas señales obtenidas sobre el mismo eje se obtiene lo mostrado en la tabla 5.3. Los resultados son el indicador del *crosstalk performance* y representan el porcentaje de interferencia sobre cada eje.

Tabla 5.3: *Crosstalk Performance*.

	Dirección de la fuerza	
	X	Y
O_X	1	0.1029
O_Y	0.0645	1

Los resultados muestran que existe un nivel de interferencia cruzada en el eje X de 10.29%. Por otro lado, el eje Y presenta una interferencia cruzada de 6.45%. Los resultados muestran una influencia considerable de las señales del eje estimulado sobre el eje perpendicular a la aplicación de la fuerza. Es de importancia mencionar que la prueba tiene una incertidumbre intrínseca, puesto que no se tiene control exacto sobre el ángulo de impacto. A pesar de realizarse con la mejor alineación posible, es imperativo diseñar una prueba más robusta en la que se mantengan las variables críticas bajo control, como la magnitud de la fuerza y el ángulo del contacto.

5.2.5. Discusión

La interferencia cruzada encontrada durante la prueba de impacto con el martillo de goma se encuentra en un valor que dista un tanto de los sistemas desarrollados en trabajos similares, como el propuesto por Yafei Qin *et al.* [72], cuya interferencia cruzada es cercana al 2%. Esto es similar a la interferencia encontrada en los dispositivos disponibles actualmente en el mercado [55], [56], sin embargo, es posible que un porcentaje importante de la interferencia sea generada por las condiciones de las pruebas realizadas, puesto que los instrumentos utilizados y el método de ejecución podrían ser mejorados. La alineación angular y lineal de la aplicación de las fuerzas no fue controlada, posiblemente convirtiéndose en una fuente de interferencia cruzada.

Algunos estudios con sistemas similares, como el realizado por Ik-Soo Kang *et al.* [73], poseen una respuesta en la frecuencia claramente observable hasta lo equivalente a 66,000 RPM, es decir, 1.1 kHz, frecuencia medible con el dispositivo propuesto en el presente. Otros trabajos, como los expuestos por E. Dimla [38] tienen una frecuencia máxima de medición de hasta 10 kHz. Dicha frecuencia se encuentra fuera del rango de medición del sistema, sin embargo, podría ser alcanzable con celdas de carga de respuesta más rápida.

5.3. Publicaciones

5.3.1. Fondo de Proyectos Especiales de Rectoría (FOPER)

El proyecto fue impulsado por el Fondo de Proyectos Especiales de Rectoría (FOPER) de la Universidad Autónoma de Querétaro en dos ocasiones: en 2018 (folio **FOPER-2018-00056**), y en 2019 (folio **FOPER-2019-01256**). Gracias al apoyo económico proporcionado, fue posible adquirir las celdas de carga de botón, un porcentaje importante de los elementos electrónicos utilizados en la etapa de instrumentación y los conectores de grado industrial. Para el desarrollo futuro se adquirió una tarjeta de desarrollo Raspberry Pi4 B, materia prima y herramientas de corte. Durante ambas oportunidades se realizaron avances significativos en el desarrollo del proyecto, como lo fueron la manufactura del sistema mecánico versión 3, la prueba con carga en desbalanceo y el diseño de las tarjetas electrónicas. Como parte de los entregables, se realizaron dos reportes técnicos y un video. Además, se realizó una entrevista al equipo que fue publicada en diversos medios de comunicación [74], [75]. A continuación se muestran fotografías de la participación en ambas ocasiones.



Figura 5.28: Preparación para FOPER 2018.



Figura 5.29: Presentación del proyecto en FOPER 2019.

5.3.2. Solicitud de patente

Con el apoyo de la universidad, a través de la Oficina de Transferencia Tecnológica de la Dirección de Posgrado e Investigación, se logró generar una solicitud de patente "*Módulo Multisensorial Para el Monitoreo de las Condiciones de Corte en Centros de Maquinado*", con expediente **MX/a/2019/015252**, protegiéndose el diseño de la etapa mecánica, y abriendo la posibilidad de la comercialización del proyecto.

El 13 de Julio de 2021 la solicitud de patente fue publicada en la gaceta de *Solicitudes de Patente, de Registros de Modelo de Utilidad y de Diseños Industriales*, en el ejemplar de Junio de 2021. Este ejemplar puede ser consultado el sistema **SIGA** del Instituto Mexicano de Propiedad Industrial (IMPI) [76], seleccionando la opción de *búsqueda simple* y colocando en el buscador el número de expediente, mencionado anteriormente.

5.4. Trabajo futuro

El presente trabajo logró cumplir la gran mayoría de sus objetivos, logrando sentar las bases para un producto capaz de ser introducido al mercado, pero para ello, se requeriría un esfuerzo en algunas áreas de oportunidad bien localizadas. A continuación se presentan los puntos de mejora más importantes para lograrlo.

- Prueba rigurosa y controlada para el cálculo de la interferencia cruzada.
- Prueba del sistema en un entorno real de corte, es decir, en un centro de maquinados CNC.
- Implementación del algoritmo de estimación de desgaste, con base en los métodos revisados previamente.
- Propuesta de un modelo matemático original para la estimación de desgaste.
- Realizar una calibración del dispositivo en un instituto especializado, por ejemplo, el CENAM [77].
- Adición de un mecanismo para la medición de fuerzas en el eje Z, lo que mejoraría la estimación del desgaste en ciertas operaciones de maquinado.
- Integración de tecnologías de la Industria 4.0.
 - Almacenamiento del histórico de datos en la nube, dado acceso remoto a la información.
- Predicción de costos a largo plazo a través de *big data*.
 - Posibilidad de predicción de falla de herramientas y del centro de maquinados en sí.
- Desarrollo de sensores, adecuando el rango, la precisión, características mecánicas, entre otras.
- Interacción del sistema con el centro de maquinados a través de macros.
 - Posibilidad de cerrar el lazo de control con el centro de maquinados para corrección de trayectorias en tiempo real.

- Desarrollo TRL-9, que permitiría introducir el sistema al mercado.
- Generación de un paquete de ingeniería para realizar una transferencia tecnológica, licenciar el uso de la patente o buscar inversión en el proyecto.

Conclusiones

El desarrollo del dispositivo ha sido un proceso de constante integración de mejoras. Durante la fabricación y la experimentación se suscitan escenarios no planeados y comportamientos no esperados debido a factores que no se contemplaron durante el proceso de diseño. Es por ello que la creación de un prototipo modular resultó ser de importancia. Al ser intercambiables sus partes mecánicas y eléctricas, se solucionaron fácilmente muchos de los problemas que de otro modo habrían requerido una modificación radical del sistema. Se destacan el rediseño de las tapas y la modificación del mecanismo de precarga del sistema, cuya corrección se realizó sobre las piezas ya existentes, impactando mínimamente el tiempo de desarrollo y los recursos disponibles.

Disponer de un prototipo físico permitió encontrar problemáticas que no habrían sido consideradas de forma conceptual. Ha servido como una forma de aprendizaje y experiencia, puesto que estos conocimientos serán una parte imprescindible para el desarrollo posterior del sistema y la culminación en un producto funcional.

El diseño conceptual del sistema mecánico incluyó un análisis y selección de tolerancias geométricas para lograr aportar a lo que podrá ser un paquete de ingeniería, que será capaz de ser transferido, licenciado o presentado como un proyecto de inversión. Contiene planos mecánicos generales e individuales y un despiece del modelo. De esta manera, se logra cumplir el objetivo específico relacionado a esta tarea.

Los resultados de las pruebas de impacto demuestran que las celdas de carga son capaces de medir en casi todo el rango de operación propuesto, a 10,000 RPM y 4 gabilanes, pero considerando únicamente $n = 5$ armónicos en vez de 9. Sería también posible considerar $n = 9$ con la frecuencia típica de operación, 6,000 RPM. Se cumple parcialmente el objetivo asociado a este resultado.

Es posible considerar el cumplimiento del objetivo relacionado a las tarjetas electrónicas, puesto que su desempeño fue en general satisfactorio. La amplificación y distribución de las señales procedentes de los sensores se realizó correctamente, sin embargo, existen áreas de oportunidad que podrían recibir una mejora, específicamente, en materia de robustez y versatilidad; por ejemplo, adicionando una carcasa para proteger las tarjetas y mejorando la portabilidad del dispositivo. Este último punto es de importancia en entornos relevantes de operación, puesto que contar con una fuente de poder para operar el circuito en campo podría resultar poco práctico.

Es claro que medir las fuerzas presentes en un entorno de maquinado debe ser un proceso sumamente fiable para que la medición del desgaste de la herramienta sea precisa y exacta, es por esto que será necesario que el sistema esté preparado a las condiciones de un entorno real. Por ello es necesaria una mayor cantidad de pruebas con el fin de conocer las limitaciones del dispositivo. Dicho esto, se logró realizar una aproximación del grado de interferencia del sistema actual con las herramientas disponibles, completándose parcialmente el objetivo relacionado. La ejecución de pruebas más controladas con equipo especializado podría proporcionar información de mayor precisión. Por otro lado, se debe hacer una consideración especial a la repetibilidad de los resultados entre ejes, puesto que el valor de interferencia cruzada del eje X dista del obtenido en el eje Y. Sería posible realizar una calibración del sistema en una institución especializada para lograr esto. Además, las pruebas en entornos reales revelarán la verdadera robustez del sistema.

La industria actual está en un proceso de integración de las nuevas tecnologías digitales que engloba la industria 4.0. Más que una sustitución de las máquinas-herramientas actuales por unas con dichas características, se busca la adaptación de las máquinas presentes actualmente en la industria, debido a que no todos los talleres y empresas son capaces de solventar los gastos de maquinaria nueva que integre aplicaciones de Industria 4.0, teniendo en cuenta que la inversión inicial, a pesar de no ser tan baja, se recuperará con los beneficios que brinda la integración de tecnologías digitales. Es por esto que toma importancia la búsqueda de soluciones de fácil acceso, cuyo impacto sea un amplio rango de talleres y empresas.

El sistema desarrollado en el presente documento es la esencia del sistema de estimación de desgaste. Por sí solo, es capaz de medir correctamente las fuerzas presentes en los procesos de maquinados con un nivel de interferencia cruzada aceptable para este nivel de desarrollo, pero que puede ser mejorado. Se han cumplido los objetivos específicos relacionados al diseño, verificación y experimentación en entornos simulados, sin embargo, para presentar el sistema completo como un producto (lo correspondiente a un TRL-6) habría sido necesaria la experimentación en un entorno real de maquinados.

Las pruebas con el dispositivo de vibración asemejan mucho al rango de frecuencias en las que operará el sistema, sin embargo no fueron emulados la temperatura, la viruta y otros factores, además de la falta de control de la fuerza ejercida sobre el sistema en las distintas pruebas. Por lo que es posible considerar alcanzado un nivel de madurez TRL-5. El desarrollo inmediato posterior sería la validación del sistema en un entorno real: un centro de maquinados CNC. De esta manera, se lograría alcanzar un nivel de maduración TRL-6.

A pesar de esto, el presente es un gran paso para el desarrollo de un sistema completo para la estimación del desgaste en herramientas. Se lograron sentar las bases para lo que podría ser una opción viable, confiable y accesible para todo tipo de talleres de maquinados, capaz de ser adaptado a las necesidades específicas de cada uno.

Bibliografía

- [1] G. P. Mikell, *Fundamentos de manufactura moderna*, pp. 1–11, 345–347, 481–506, 543–551, 888. México: McGraw-Hill, 2007.
- [2] J. A. Schey, *Procesos de manufactura*, pp. 3–7, 34, 660–668, 722–736. México: McGraw-Hill, 2007.
- [3] “BBC - History - Historic Figures: John Wilkinson (1728 - 1808).” British Broadcasting Corporation. https://www.bbc.co.uk/history/historic_figures/wilkinson_john.shtml, 2014. (accessed Jul. 5, 2021).
- [4] “John Wilkinson & Bersham Ironworks - A Tremendous Bore.” Wrexham County Borough Council. http://old.wrexham.gov.uk/english/heritage/bersham_ironworks/tremendous_bore.htm, 2019. (accessed Jul. 5, 2021).
- [5] Bantam Tools, “History of CNC Machining, Part 1: The People, Stories, and Inventions That Made Today’s Tech Possible.” Medium. <https://medium.com/cnc-life/history-of-cnc-machining-part-1-2a4b290d994>, 2019. (accessed Jul. 5, 2021).
- [6] S. Rand, “Archives: Numerical Control System.” Engineering and Technology History Wiki. https://ethw.org/Archives:Numerical_Control_System, 2015. (accessed Jul. 5, 2021).
- [7] J. P. Davim, *Machining - Fundamentals and Recent Advances*, pp. V, 271–325. Portugal: Springer-Verlag London, 2008.
- [8] M. Mathis and B. Nash, “Modern Marvels: Machine Tools,” 2000.
- [9] I. McNeil, “Control revolution and electronic metrology,” in *An encyclopedia of the history of technology*, p. 422, Inglaterra: McGraw-Hill, 1990.
- [10] G. T. Smith, *CNC Machining Technology - Volume 3: Part Programming Techniques*, pp. 1–3, 15–17, 32–36, 217–223. Springer-Verlag London, 1993.
- [11] H. Lasi, P. Fettke, H.-G. Kemper, T. Feld, and M. Hoffmann, “Industry 4.0,” *Business & Information Systems Engineering*, vol. 4, no. 4, pp. 239–242, 2014.
- [12] S. Vaidya, P. Ambad, and S. Bhosle, “Industry 4.0 – a glimpse,” *Procedia Manufacturing*, vol. 20, pp. 233–238, 2018. 2nd International Conference on Materials, Manufacturing and

Design Engineering (iCMMMD2017), 11-12 December 2017, MIT Aurangabad, Maharashtra, INDIA.

- [13] Ángela Andrea Castro, “Industria 4.0: Escuche lo que las máquinas de su taller tienen por decir.” Gardner Business Media, Inc. <https://www.mms-mexico.com/articulos/industria-40-escuche-lo-que-las-maquinas-de-su-taller-tienen-por-decir>, 2019. (accessed Jul. 5, 2021).
- [14] V. Astakhov, “Machining of hard materials - definitions and industrial applications,” in *Machining of Hard Materials* (J. P. Davim, ed.), ch. 1, pp. 1–28, Portugal: Springer-Verlag London, 2011.
- [15] M. Shukla, “Abrasive water jet milling,” in *Nontraditional Machining Processes* (J. P. Davim, ed.), ch. 6, pp. V, 177–199, Portugal: Springer-Verlag London, 2013.
- [16] K. Gupta, N. K. Jain, and R. Laubsche, “Overview of hybrid machining processes,” in *Hybrid Machining Processes - Perspectives on Machining and Finishing*, ch. 1, pp. V–7, Springer International Publishing, 2016.
- [17] K. Cheng, “Machining dynamics in milling processes,” in *Machining Dynamics - Fundamentals, Applications and Practices* (K. Cheng, ed.), ch. 7, pp. 197–213, UK: Springer-Verlag London, 2009.
- [18] S. Liang and A. J. Shih, “Mechanics of machining,” in *Analysis of Machining and Machine Tools* (S. Liang and A. J. Shih, eds.), ch. 7, pp. 113–128, Springer, Boston, MA, 2016.
- [19] S. C. Black, V. Chiles, A. Lissaman, and S. Martin in *Principles of Engineering Manufacture (Third Edition)* (S. C. Black, V. Chiles, A. Lissaman, and S. Martin, eds.), pp. 103–127, 267–315, Oxford: Butterworth-Heinemann, third edition ed., 1996.
- [20] M. Mareš, O. Horejš, and L. Havlík, “Thermal error compensation of a 5-axis machine tool using indigenous temperature sensors and cnc integrated python code validated with a machined test piece,” *Precision Engineering*, vol. 66, pp. 21–30, 2020.
- [21] D. Kim and D. Jeon, “Fuzzy-logic control of cutting forces in cnc milling processes using motor currents as indirect force sensors,” *Precision Engineering*, vol. 35, no. 1, pp. 143–152, 2011.
- [22] A. Albrecht, S. S. Park, Y. Altintas, and G. Pritschow, “High frequency bandwidth cutting force measurement in milling using capacitance displacement sensors,” *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 45, no. 9, pp. 993–1008, 2005.
- [23] S. Yaldız and F. Ünsaçar, “A dynamometer design for measurement the cutting forces on turning,” *Measurement*, vol. 39, no. 1, pp. 80–89, 2006.
- [24] L. Ma, S. N. Melkote, and J. B. Castle, “Pvdf sensor-based monitoring of milling torque,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 70, no. 9, pp. 1603–1614, 2014.
- [25] Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), “Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas (DENUE).” [Online]. Available: <https://www.inegi.org.mx/app/mapa/denue/default.aspx>. Accessed: Jul., 2021.

- [26] “PIB y cuentas nacionales - Producto Interno Bruto Trimestral - Por actividad económica.” [Online]. Available: <https://www.inegi.org.mx/temas/pib/#Tabulados>. Accessed: Jul., 2021.
- [27] “Anuario Económico 2019, Querétaro Competitivo,” tech. rep., Secretaría de Desarrollo Sustentable del Poder Ejecutivo del Estado de Querétaro (SEDESU), Querétaro, Qro. Accessed: Jul., 2021.
- [28] “Anuario Económico 2020, Querétaro Competitivo,” tech. rep., Secretaría de Desarrollo Sustentable del Poder Ejecutivo del Estado de Querétaro (SEDESU), Querétaro, Qro. Accessed: Jul., 2021.
- [29] A. Senapati, “A review on the effect of process parameters on different output parameters during machining of several materials,” *International Journal of Engineering Science and Technology*, 03 2014.
- [30] Y. Wong, A. Nee, X. Li, and C. Reisdorf, “Tool condition monitoring using laser scatter pattern,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 63, no. 1, pp. 205–210, 1997.
- [31] N. H. Abu-Zahra and T. H. Nayfeh, “Calibrated method for ultrasonic on-line monitoring of gradual wear during turning operations,” *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 37, no. 10, pp. 1475–1484, 1997.
- [32] G. de Anda-Rodríguez and E. Castillo-Castañeda, “Un método de monitoreo del desgaste de una herramienta de corte basado en un sensor de proximidad de fibra óptica,” *Ingeniare – Revista Chilena de Ingeniería*, vol. 14, no. 2, pp. 124–129, 2006.
- [33] D. D’Addona and R. Teti, “Image data processing via neural networks for tool wear prediction,” *Procedia CIRP*, vol. 12, pp. 252–257, 2013. Eighth CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering.
- [34] S. Kakade, L. Vijayaraghavan, and R. Krishnamurthy, “In-process tool wear and chip-form monitoring in face milling operation using acoustic emission,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 44, no. 3, pp. 207–214, 1994.
- [35] Z. Li, R. Liu, and D. Wu, “Data-driven smart manufacturing: Tool wear monitoring with audio signals and machine learning,” *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 48, pp. 66–76, 2019.
- [36] M. Davies, T. Ueda, R. M’Saoubi, B. Mullany, and A. Cooke, “On the measurement of temperature in material removal processes,” *CIRP Annals*, vol. 56, no. 2, pp. 581–604, 2007.
- [37] K. AP, J. GG, and K. A. S. VG, “Investigation on cutting temperature and cutting force in turning aisi 304 austenitic stainless steel using alticrn coated carbide insert,” *Machining and Machinability of Materials*, vol. 15, pp. 147–156, 2014.
- [38] E. Dimla, “Sensor signals for tool-wear monitoring in metal cutting operations—a review of methods,” *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 40, pp. 1073–1098, 06 2000.

- [39] D. Zang, H. S. Dai, and D. Chen, “On-line monitoring of tool breakage of tool using spindle in milling,” in *1st Asia-Pacific and 2nd Japan-China International Conference Progress of Cutting and Grinding*, pp. 270–276, September, 1994.
- [40] S. Jetley and A. Gollajesse, “Measuring tool wear using magnetism,” in *Japan-USA Symposium Flexible Automation – A Pacific Rim Conference*, pp. 345–347, July 11-18, 1994.
- [41] T.-R. Ko and Y. Koren, “Cutting force model for tool wear estimation,” *Proceedings of the North American Manufacture Research Conference*, pp. 166–169, 01 1989.
- [42] D. Okumura, S. Sakaino, and T. Tsuji, “High dynamic range sensing by a multistage six-axis force sensor with stopper mechanism,” pp. 1–6, 05 2018.
- [43] M. Wan, H. Yuan, J. Feng, W. Zhang, and W. Yin, “Industry-oriented method for measuring the cutting forces based on the deflections of tool shank,” *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 130, 06 2017.
- [44] “Dynamometers, cutting force measurement.” Kistler. <https://www.kistler.com/en/solutions/research-and-development-testing/dynamometers-for-cutting-force-measurement/>. (accessed Jul. 5, 2021).
- [45] “Effective process analysis and process optimization by measuring cutting forces with a dynamometer.” Kistler. <https://www.kistler.com/en/solutions/research-and-development-testing/dynamometers-for-cutting-force-measurement/analysis-of-cutting-forces-and-process-optimization-with-dynamometers/>. (accessed Jul. 23, 2021).
- [46] R. de Jesús Romero Troncoso, *Procesamiento de señales para la detección de ruptura de herramienta en sistemas de manufactura por control numérico por computadora*. PhD thesis, Universidad Autónoma de Querétaro, México, 2004.
- [47] W. L. Tafolla, “Detección de ruptura en herramientas de corte en el proceso de taladrado,” Master’s thesis, Universidad Autónoma de Querétaro, México, 2004.
- [48] M. T. Hernández, *Monitoreo, análisis y modelado fenomenológico del desgaste de la herramienta bajo condiciones de corte variables en torno CNC*. PhD thesis, Universidad Autónoma de Querétaro, México, 2010.
- [49] G. Díaz, “Evaluación del estado de las herramientas de corte en el proceso de torneado a través del análisis del flujo magnético.” Universidad Autónoma de Querétaro, México, 2021.
- [50] M. E. Amestoy, “Introducción a los procesos de mecanizado,” in *Principios de Mecanizado y Planificación de Procesos*, ch. 2, pp. 7–11, Cartagena: Universidad Politécnica de Cartagena, 2007.
- [51] L.C.Lee, K.S.Lee, and C.S.Gan, “On the correlation between dynamic cutting force and tool wear,” *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 29, p. 295–303, 1989.
- [52] V. M. H. Guzmán and R. S. O. y R. V. Carrillo Serrano, *Control Automático: Teoría de Diseño, Construcción de Prototipos, Modelado, Identificación y Pruebas Experimentales*, pp. 3–7, 660–668. México, DF: Colección CIDETEC del Instituto Politécnico Nacional, 2013.

- [53] A. G. Barrera, “Determinación de duración de herramientas de torno bajo diferentes condiciones de corte.” Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Sevilla, 2015.
- [54] “Modular Multi-Channel Laboratory Charge Amplifier - Type 5080A.” Kistler. <https://www.kistler.com/en/product/type-5080a/>. (accessed Jul. 23, 2021).
- [55] “Modular Multi-Channel Laboratory Charge Amplifier - Type 9139AA.” Kistler. <https://www.kistler.com/en/product/type-9139aa/>. (accessed Jul. 23, 2021).
- [56] “Modular Multi-Channel Laboratory Charge Amplifier - Type 9257B.” Kistler. <https://www.kistler.com/en/product/type-9257b/>. (accessed Jul. 23, 2021).
- [57] D. Schrand, “Cross-talk compensation using matrix methods,” *Sensors & Transducers Journal*, vol. 79, pp. 1157–1163, 2007.
- [58] “Etapas de maduración tecnológica, según metodología “Technology Readiness Level” de la NASA.” Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología. https://www.cibnor.gob.mx/images/stories/covisti/ott_cepat/Niveles_de_Maduracion_Tecnologica.pdf, 2015. (accessed Jul. 5, 2021).
- [59] I. Tzinis, “Technology Readiness Level.” National Aeronautics and Space Administration. https://www.nasa.gov/directorates/heo/scan/engineering/technology/txt_accordion1.html, 2012. (accessed Jul. 5, 2021).
- [60] S. Moran, “Chapter 1 - process plant design,” in *An Applied Guide to Process and Plant Design (Second Edition)* (S. Moran, ed.), pp. 5–24, Elsevier, second edition ed., 2019.
- [61] ISO, *ISO 299:1987: Machine tool tables — T-slots and corresponding bolts*, p. 3. International Organization for Standardization, Apr. 1987. [Online]. Available for purchase at: <https://www.iso.org/standard/4229.html>.
- [62] A. Chevalier, *Dibujo Industrial*, pp. 6–48. México: Editorial Limusa, 2005.
- [63] ISO, *ISO 8015:2011: Geometrical product specifications (GPS) — Fundamentals — Concepts, principles and rules*, p. 10. International Organization for Standardization, Jun. 2011. [Online]. Available for purchase at: <https://www.iso.org/standard/4229.html>.
- [64] “Subminiature, Button Compression Load Cell.” Omega Engineering. <https://www.omega.com/en-us/force-strain-measurement/load-cells/p/LCKD>. (accessed Jul. 5, 2021).
- [65] “0.75” Diameter, Miniature Button Compression Load Cell.” Omega Engineering. <https://www.omega.com/en-us/force-strain-measurement/load-cells/lc302/p/LCM302-1KN>. (accessed Jul. 5, 2021).
- [66] “Subminiature Load Button.” FUTEK Advanced Sensor Technology, Inc. <https://www.futek.com/store/load-cells/load-button/subminiature-load-button-LLB302>. (accessed Jul. 5, 2021).
- [67] “Células De Carga Tipo S.” Flintec Inc. <https://www.flintec.com/mx/sensores-de-peso/celulas-de-carga/tipo-s>. (accessed Jul. 10, 2021).

- [68] “What Is A Beam Load Cell, And How Does It Work?.” Flintec Inc. https://www.flintec.com/mx/sensores-de-peso/celulas-de-carga/what-is-a-beam-load-cell-and-how-does-it-work?__geom=%E2%9C%AA. (accessed Jul. 10, 2021).
- [69] Texas Instruments, *INA849 Ultra-Low-Noise, High-Bandwidth, Instrumentation Amplifier*, 04 2021. Rev. 2.0.
- [70] TIRA Schwingtechnik - Vibration Test Systems, *Vibration Test System - TV 51144-IV*. http://www.acoutronic.eu/pdf/vibration/system_tv_51144_in_eng.pdf (accessed Jul. 15, 2021).
- [71] TIRA Schwingtechnik - Vibration Test Systems, *Vibration Test Systems - Selection Guide*, 6 2010. https://www.europages.com/filestore/gallery/9b/33/vibration-test-systems-brochure_7cd4f729.pdf (Accessed Jul. 15, 2021).
- [72] Y. Qin, Y. Zhao, Y. Li, Y. Zhao, and P. Wang, “A novel dynamometer for monitoring milling process,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 92, pp. 2535–2543, 2017.
- [73] I.-S. Kang, J.-H. Kim, C. Hong, and J.-S. Kim, “Development and evaluation of tool dynamometer for measuring high frequency cutting forces in micro milling,” *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, vol. 11, pp. 817–821, 2010.
- [74] Lorena Rudo, “Diseñan estudiantes UAQ prototipo para optimizar herramienta industrial.” AM de Querétaro, <https://amqueretaro.com/sociedad/2018/09/30/disenan-estudiantes-uaq-prototipo-para-optimizar-herramienta-industrial/>, 2018. (accessed Ago. 01, 2021).
- [75] “Diseñan estudiantes UAQ prototipo para optimizar herramienta industrial.” UAQ Universidad Autónoma de Querétaro a través de Facebook, <https://www.facebook.com/uaq.mx/posts/10155816441259849>, 2018. (accessed Ago. 01, 2021).
- [76] “Gaceta de la Propiedad Industrial.” Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial (IMPI), <https://siga.impi.gob.mx/newSIGA/content/common/principal.jsf>, 2021. (accessed Jul. 25, 2021).
- [77] “Catálogo de servicios - Calibración de instrumentos de medición de fuerza de alta exactitud (tracción o compresión).” Centro Nacional de Metrología (CENAM), <https://www.cenam.mx/calibracion/servicios.aspx?division=720>. (accessed Ago. 01, 2021).

Scripts creados

En apoyo a la Sección [5](#), Resultados, se presentan los scripts creados para el despliegue del espectro en la frecuencia, las gráficas de Bode, el tiempo de respuesta y la interferencia cruzada. Los scripts fueron generados en Matlab.

El script que genera el espectro de una frecuencia individual (Apéndice [A.1](#)) recibe el archivo .csv estándar del osciloscopio, que contiene la señal periódica producida por el sistema ante una excitación a una frecuencia específica y genera el diagrama de espectro en la frecuencia. Con esta figura, el usuario es capaz de seleccionar la magnitud dominante para su registro.

El script presentado en el Apéndice [A.2](#) genera el diagrama de Bode de magnitud a partir de las frecuencias dominantes obtenidas de los espectros de frecuencia individuales. Se permite al usuario elegir en “User Input” el archivo de Excel que contiene la matriz que relaciona las frecuencias y las magnitudes.

Para el cálculo del tiempo de respuesta de cada celda de carga se creó el script del Apéndice [A.3](#). El script toma las señales de las 20 pruebas de impacto realizadas, tanto del martillo piezoeléctrico, como de las celdas de carga. Además, el script genera gráficas similares a la presentada en la Figura [5.8](#).

Finalmente, se presenta en el Apéndice [A.4](#) el script que estima el porcentaje de interferencia cruzada toma las señales correspondientes a los ejes ortogonales por cada eje.

A.1. Espectro de frecuencia

Script A.1: Obtención del espectro en la frecuencia.

```
1 clear variables
2 close all
3 clc
4 % % % % % % % % User input % % % % % % % %
5
6 % Path to the input file
7 xlsdata = 'C:\Users\usuario\Desktop\Prueba eje X\ALL0010\F0010CH3.CSV';
8
9
10 % % % % % % % % Auto execution % % % % % % % %
11
12 % Number of samples (length of data obtained)
13 recordlength = xlsread(xlsdata,'B1:B1');
14
15 % Creates range of data, saves it as a string. i.e.: 'D1:E2500'
16 rangeend = sprintf('D1:E% 0.0f', recordlength);
17
18 % % % % Processing % % % %
19
20 [data] = xlsread(xlsdata,rangeend); % read data in range
21
22 time = data(:,1); % sampling time
23 signal = data(:,2); % signal data in Time-Domain
24
25 T = xlsread(xlsdata,'B2:B2'); % Sampling period
26 Fs = 1/T; % Sampling frequency
27
28 L = length(signal); % Length of signal
29 t = (0:L-1)*T; % Time vector
30
31 X = signal;
32
33 [A,b] = periodogram(signal,[],[],Fs,'power');
34
35 semilogx(b(1:2000),A(1:2000));
36
37 axis([0 5000 0 0.2e-5]) % Limit plot X-axis range
38 title('Espectro de frecuencia','FontSize',12,'interpreter','Latex')
39 xlabel('Frecuencia (Hz)','FontSize',12,'interpreter','Latex','FontSize',12,'
    interpreter','Latex')
40 ylabel('Magnitud (dB)','FontSize',12,'interpreter','Latex','FontSize',12,'interpreter'
    , 'Latex')
41 grid on
42 grid minor
```

A.2. Diagrama de Bode

Script A.2: Obtención del diagrama de Bode.

```
1 clear variables
2 close all
3 clc
4 % % % % % % % % User input % % % % % % % %
5
6 % Path to the input file
7 % frequency data and corresponding capture number (select when prompted, then press OK
  )
8 % frequency on first column, magnitude on second
9 xlsdata = xlsread('C:\Users\usuario\Desktop\Prueba eje X\Bode_Input.xlsx',-1);
10
11 semilogx(xlsdata(:,1),xlsdata(:,2))
12 axis([0 2500 0 3.0e-5])
13 xticks([0 1 100 1000])
14 title(strcat('Diagrama de Bode para canal \#',ch),'FontSize',12,'interpreter','Latex')
15 xlabel('Frecuencia (Hz)','FontSize',12,'interpreter','Latex')
16 ylabel('Magnitud (dB)','FontSize',12,'interpreter','Latex')
17 grid on
18 grid minor
```

A.3. Tiempo de respuesta

Script A.3: Obtención del tiempo de respuesta

```
1 clear variables
2 close all
3 clc;
4
5 file_1='C:\Users\Hector\Desktop\Tiempo de respuesta\Martillo impacto celdas\ALL0147\
   F0147CH1.CSV';
6 file_2='C:\Users\Hector\Desktop\Tiempo de respuesta\Martillo impacto celdas\ALL0147\
   F0147CH2.CSV';
7
8 folder='C:\Users\Hector\Desktop\Tiempo de respuesta\Martillo impacto celdas';
9
10 recordlenght1 = xlsread(file_1,'B1:B1');
11 recordlenght2 = xlsread(file_2,'B1:B1');
12
13 vector_ch1=zeros(20,2500);
14
15 rangeend1 = sprintf('D1:E% 0.0f', recordlenght1);
16 rangeend2 = sprintf('D1:E% 0.0f', recordlenght2);
17
18 [data] = xlsread(file_1,rangeend1);
19 [data2] = xlsread(file_2,rangeend2);
20
21 time = data(:,1); % sampling time
22 signal = data(:,2); % signal data in Time-Domain
23 signal2 = data2(:,2);
24
25 L = length(signal); % Length of signal
26
27 T = xlsread(file_1,'B2:B2'); % Sampling period
28 Fs = 1/T;
29 t = (0:L-1)*T; % Time vector
30
31 pks_v = zeros(20,1);
32 locs_v = zeros(20,1);
33
34 NoM=167;
35 k=1;
36 for i=147:NoM
37
38     if i ~= 162
39         index=sprintf('0% d',i);
40         file_ch1 = strcat(folder,'\ALL',index,'\F',index,'CH1.CSV');
41         file_ch2 = strcat(folder,'\ALL',index,'\F',index,'CH2.CSV');
42
43         recordlenght1 = xlsread(file_ch1,'B1:B1');
44         recordlenght2 = xlsread(file_ch2,'B1:B1');
45
46
47         rangeend1 = sprintf('E1:E% 0.0f', recordlenght1);
48         rangeend2 = sprintf('E1:E% 0.0f', recordlenght2);
49
50         [data_ch1] = xlsread(file_ch1,rangeend1);
```

```

51     [data_ch2] = xlsread(file_ch2,rangeend2);
52
53     for m=1:2500
54         vector_ch1(k,m) = data_ch1(m);
55         vector_ch2(k,m) = data_ch2(m);
56     end
57
58     [pks_1,locs_1] = findpeaks(data_ch1,'MinPeakDistance',300);
59     [pks_2,locs_2] = findpeaks(data_ch2,'MinPeakDistance',750);
60
61     pks_v_Hammer(k) = pks_1(1);
62     locs_v_Hammer(k) = locs_1(1)*T;
63
64     pks_v_Cell(k) = pks_2(1);
65     locs_v_Cell(k) = locs_2(1)*T;
66
67     k=k+1;
68
69     else
70         sprintf('File not found')
71     end
72 end
73
74 % Amplificacion celda
75
76 x = linspace(1,20,20);
77
78 figure(1);
79 scatter(x,locs_v_Cell);
80
81 figure(2);
82 scatter(x,locs_v_Hammer);
83
84 % Diferencia de tiempo de martillo y celda de carga
85 diff_v = locs_v_Cell - locs_v_Hammer;
86
87
88 for m=1: 20
89
90     if (m < 6)
91         diff_v1(m) = diff_v(m);
92     end
93     if ((m < 11)&&(m>5))
94         diff_v2(m-5) = diff_v(m);
95     end
96     if ((m < 16)&&(m>10))
97         diff_v3(m-10) = diff_v(m);
98     end
99     if ((m < 21)&&(m>15))
100         diff_v4(m-15) = diff_v(m);
101     end
102 end
103 fz1b1=(pks_v_Cell-0.0033)/0.0043
104
105 figure(3);
106 scatter(x,diff_v);

```

```

107
108 M=mean(diff_v);
109 M
110
111 figure('name','Senales Celda 1 y Martillo');
112 plot(t,vector_ch1(1,:),t,vector_ch2(1,:));
113 axis([-inf inf -9 9])
114 ylabel('Amplitud (V)','FontSize',12,'interpreter','Latex')
115 xlabel('Tiempo (ms)','FontSize',12,'interpreter','Latex')
116 grid on
117 grid minor
118
119
120 figure('name','Senales Celda 2 y Martillo');
121 plot(t,vector_ch1(6,:),t,vector_ch2(6,:));
122 axis([-inf inf -9 9])
123 ylabel('Amplitud (V)','FontSize',12,'interpreter','Latex')
124 xlabel('Tiempo (ms)','FontSize',12,'interpreter','Latex')
125 grid on
126 grid minor
127
128
129 figure('name','Senales Celda 3 y Martillo');
130 plot(t,vector_ch1(11,:),t,vector_ch2(11,:));
131 axis([-inf inf -9 9])
132 ylabel('Amplitud (V)','FontSize',12,'interpreter','Latex')
133 xlabel('Tiempo (ms)','FontSize',12,'interpreter','Latex')
134 grid on
135 grid minor
136
137
138 figure('name','Senales Celda 4 y Martillo');
139 plot(t,vector_ch1(16,:),t,vector_ch2(16,:));
140 axis([-inf inf -9 9])
141 ylabel('Amplitud (V)','FontSize',12,'interpreter','Latex')
142 xlabel('Tiempo (ms)','FontSize',12,'interpreter','Latex')
143 grid on
144 grid minor
145
146 % Calculo de magnitud de fuerza de impacto de martillo
147
148 Gv_dB = 34;
149 Gv = 10^(Gv_dB/20)
150
151 % Sensibilidad del sensor
152 Ks = 0.01;
153
154 % Voltaje inicial
155 vi = pks_v_Hammer/Gv;
156
157 % Calculo de fuerza
158 Fn = vi/Ks
159 diff_v
160 diff_v1
161 diff_v2
162 diff_v3

```

```

163 diff_v4
164
165 % Calculo de error absoluto y relativo celda #1
166 M1= mean(diff_v1);
167 D1= diff_v1 - M1
168 Err_Abs1 = sqrt(sum(D1.^2)/(5*(5-1)))
169 Err_Rel1 = abs(Err_Abs1/M1)
170
171 % Calculo de error absoluto y relativo celda #2
172 M2= mean(diff_v2);
173 D2= diff_v2 - M2
174 Err_Abs2 = sqrt(sum(D2.^2)/(5*(5-1)))
175 Err_Rel2 = abs(Err_Abs2/M2)
176
177 % Calculo de error absoluto y relativo celda #3
178 M3= mean(diff_v3);
179 D3= diff_v3 - M3
180 Err_Abs3 = sqrt(sum(D3.^2)/(5*(5-1)))
181 Err_Rel3 = abs(Err_Abs3/M3)
182
183 % Calculo de error absoluto y relativo celda #4
184 M4= mean(diff_v4);
185 D4= diff_v4 - M4
186 Err_Abs4 = sqrt(sum(D4.^2)/(5*(5-1)))
187 Err_Rel4 = abs(Err_Abs4/M4)
188
189 for v=1: 5
190     Err_Rel1_V(v) = abs(Err_Rel1)*diff_v1(v)
191     Err_Rel2_V(v) = abs(Err_Rel2)*diff_v2(v)
192     Err_Rel3_V(v) = abs(Err_Rel3)*diff_v3(v)
193     Err_Rel4_V(v) = abs(Err_Rel4)*diff_v4(v)
194 end
195 % x_cell = (1:5)
196 x_cell = linspace(1,5,5);
197
198 % -----Graficas de dispersion con error Celda No. 1
199
200 % % Celda No. 1
201 figure('name','Dispersion celda #1')
202 scatter(x_cell,diff_v1)
203 axis([0 6 1.25e-4 1.7e-4])
204 xticks([0 1 2 3 4 5])
205 xlabel('N\''umero de prueba','FontSize',12,'interpreter','Latex')
206 ylabel('Tiempo de respuesta (s)','FontSize',12,'interpreter','Latex')
207 grid on
208 grid minor
209
210 % Grafica de barra de error 1
211 figure('name','Grafico Error de Celda 1')
212 errorbar(x_cell,diff_v1,Err_Rel1_V,'vertical','o');
213 axis([0 6 1.25e-4 1.65e-4])
214 xticks([0 1 2 3 4 5])
215 xlabel('N\''umero de prueba','FontSize',12,'interpreter','Latex')
216 ylabel('Tiempo de respuesta (s)','FontSize',12,'interpreter','Latex')
217 grid on
218 grid minor

```

```

219
220
221
222 % -----Graficas de dispersion con error Celda No. 2
223 % % Celda No. 2
224 figure('name','Dispersion celda #2')
225 scatter(x_cell,diff_v2)
226 axis([0 6 1.25e-4 1.6e-4])
227 xticks([0 1 2 3 4 5])
228 xlabel('N\''umero de prueba','FontSize',12,'interpreter','Latex')
229 ylabel('Tiempo de respuesta (s)','FontSize',12,'interpreter','Latex')
230 grid on
231 grid minor
232
233 % Grafica de barra de error 2
234 figure('name','Grafico Error de Celda 2')
235 errorbar(x_cell,diff_v2,Err_Rel2_V,'vertical','o');
236 axis([0 6 1.25e-4 1.6e-4])
237 xticks([0 1 2 3 4 5])
238 xlabel('N\''umero de prueba','FontSize',12,'interpreter','Latex')
239 ylabel('Tiempo de respuesta (s)','FontSize',12,'interpreter','Latex')
240 grid on
241 grid minor
242
243
244
245 % -----Graficas de dispersion con error Celda No. 3
246 % % Celda No. 3
247 figure('name','Dispersion celda #3')
248 scatter(x_cell,diff_v3)
249 axis([0 6 1.25e-4 1.6e-4])
250 xticks([0 1 2 3 4 5])
251 xlabel('N\''umero de prueba','FontSize',12,'interpreter','Latex')
252 ylabel('Tiempo de respuesta (s)','FontSize',12,'interpreter','Latex')
253 grid on
254 grid minor
255
256 % Grafica de barra de error 3
257 figure('name','Grafico Error de Celda 3')
258 errorbar(x_cell,diff_v3,Err_Rel3_V,'vertical','o');
259 axis([0 6 1.25e-4 1.6e-4])
260 xticks([0 1 2 3 4 5])
261 xlabel('N\''umero de prueba','FontSize',12,'interpreter','Latex')
262 ylabel('Tiempo de respuesta (s)','FontSize',12,'interpreter','Latex')
263 grid on
264 grid minor
265
266
267
268 % -----Graficas de dispersion con error Celda No. 4
269 % % Celda No. 4
270 figure('name','Dispersion celda #4')
271 scatter(x_cell,diff_v4)
272 axis([0 6 1.25e-4 1.6e-4])
273 xticks([0 1 2 3 4 5])
274 xlabel('N\''umero de prueba','FontSize',12,'interpreter','Latex')

```

```

275 ylabel('Tiempo de respuesta (s)','FontSize',12,'interpreter','Latex')
276 grid on
277 grid minor
278
279
280 % Grafica de barra de error 4
281 figure('name','Grafico Error de Celda 4')
282 errorbar(x_cell,diff_v4,Err_Rel4_V,'vertical','o');
283 axis([0 6 1.25e-4 1.6e-4])
284 xticks([0 1 2 3 4 5])
285 xlabel('N\''umero de prueba','FontSize',12,'interpreter','Latex')
286 ylabel('Tiempo de respuesta (s)','FontSize',12,'interpreter','Latex')
287 grid on
288 grid minor
289
290
291
292
293
294 % -----Obtencion de todos los datos disponibles-----%

```

A.4. Estimación de interferencia cruzada (*Crosstalk*)

Script A.4: Estimación de la interferencia cruzada

```
1 clear variables
2 close all
3 clc;
4
5 % Canales del eje X
6 file_X1='C:\Users\Hector\Desktop\CrossTalk\Pruebas 13 de Febrero\ALL0102\F0102CH1.CSV'
7 file_X2='C:\Users\Hector\Desktop\CrossTalk\Pruebas 13 de Febrero\ALL0102\F0102CH2.CSV'
8 file_X3='C:\Users\Hector\Desktop\CrossTalk\Pruebas 13 de Febrero\ALL0102\F0102CH3.CSV'
9 file_X4='C:\Users\Hector\Desktop\CrossTalk\Pruebas 13 de Febrero\ALL0102\F0102CH4.CSV'
10
11 % Canales del eje Y
12 file_Y1='C:\Users\Hector\Desktop\CrossTalk\Pruebas 13 de Febrero\ALL0103\F0103CH1.CSV'
13 file_Y2='C:\Users\Hector\Desktop\CrossTalk\Pruebas 13 de Febrero\ALL0103\F0103CH2.CSV'
14 file_Y3='C:\Users\Hector\Desktop\CrossTalk\Pruebas 13 de Febrero\ALL0103\F0103CH3.CSV'
15 file_Y4='C:\Users\Hector\Desktop\CrossTalk\Pruebas 13 de Febrero\ALL0103\F0103CH4.CSV'
16
17 recordlenght = xlsread(file_X1,'B1:B1');
18
19 rangeend = sprintf('E1:E% 0.0f', recordlenght);
20
21 [data_X_ch1] = xlsread(file_X1,rangeend);
22 [data_X_ch2] = xlsread(file_X2,rangeend);
23 [data_X_ch3] = xlsread(file_X3,rangeend);
24 [data_X_ch4] = xlsread(file_X4,rangeend);
25
26 [data_Y_ch1] = xlsread(file_Y1,rangeend);
27 [data_Y_ch2] = xlsread(file_Y2,rangeend);
28 [data_Y_ch3] = xlsread(file_Y3,rangeend);
29 [data_Y_ch4] = xlsread(file_Y4,rangeend);
30
31
32 L = length(data_X_ch1); % Length of signal
33 Fs = 1/1.00E-05; % Sampling frequency
34 T = xlsread(file_X1,'B2:B2'); % Sampling period
35 Fs = 1/T;
36 t = (0:L-1)*T; % Time vector
37
38 y1 = lowpass(data_Y_ch1,700,Fs);
39 figure('name','Senal filtrada y1');
40 plot(t,y1);
41
42 y2 = lowpass(data_Y_ch2,400,Fs);
43 figure('name','Senal filtrada y2');
44 plot(t,y2);
```

```

45
46 figure('name','Respuesta Eje X')
47 plot(t,data_X_ch1,t,data_X_ch2,t,data_X_ch3,t,data_X_ch4);
48 axis([0 0.025 -0.65 0.65])
49 set(legend('Celda \#1','Celda \#3','Celda \#2','Celda \#4'),'FontSize',12,'interpreter
    ','latex')
50 xlabel('Tiempo (s)','FontSize',12,'interpreter','Latex')
51 ylabel('Amplitud (V)','FontSize',12,'interpreter','Latex')
52 grid on
53 grid minor
54
55
56 figure('name','Respuesta Eje Y')
57 plot(t,data_X_ch1,t,data_Y_ch2,t,data_Y_ch3,t,data_Y_ch4);
58 axis([0 0.025 -0.8 1.3])
59 set(legend('Celda \#1','Celda \#3','Celda \#2','Celda \#4'),'FontSize',12,'interpreter
    ','latex')
60 xlabel('Tiempo (s)','FontSize',12,'interpreter','Latex')
61 ylabel('Amplitud (V)','FontSize',12,'interpreter','Latex')
62 grid on
63 grid minor
64
65 [pks_X1,locs_X1] = findpeaks(data_X_ch1,'MinPeakDistance',300);
66 [pks_X2,locs_X2] = findpeaks(data_X_ch2,'MinPeakDistance',300);
67 [pks_X3,locs_X3] = findpeaks(data_X_ch3,'MinPeakDistance',300);
68 [pks_X4,locs_X4] = findpeaks(data_X_ch4,'MinPeakDistance',300);
69
70 [pks_Y1,locs_Y1] = findpeaks(data_Y_ch1,'MinPeakDistance',300);
71 [pks_Y2,locs_Y2] = findpeaks(data_Y_ch2,'MinPeakDistance',300);
72 [pks_Y3,locs_Y3] = findpeaks(data_Y_ch3,'MinPeakDistance',300);
73 [pks_Y4,locs_Y4] = findpeaks(data_Y_ch4,'MinPeakDistance',300);
74
75 % -----Graficas de localizacion de picos de voltaje Eje X
76 figure('name','Picos Canal #X1')
77 findpeaks(data_X_ch1,'MinPeakDistance',300)
78
79 figure('name','Picos Canal #X2')
80 findpeaks(data_X_ch2,'MinPeakDistance',300)
81
82 figure('name','Picos Canal #X3')
83 findpeaks(data_X_ch3,'MinPeakDistance',300)
84
85 figure('name','Picos Canal #X4')
86 findpeaks(data_X_ch4,'MinPeakDistance',300)
87
88
89 % -----Graficas de localizacion de picos de voltaje Eje Y
90 figure('name','Picos Canal #Y1')
91 findpeaks(data_Y_ch1,'MinPeakDistance',300)
92
93 figure('name','Picos Canal #Y2')
94 findpeaks(data_Y_ch2,'MinPeakDistance',300)
95
96 figure('name','Picos Canal #Y3')
97 findpeaks(data_Y_ch3,'MinPeakDistance',300)
98

```

```
99 figure('name', 'Picos Canal #Y4')
100 findpeaks(data_Y_ch4,'MinPeakDistance',300)
101
102 % Promedio de valores pico de senales del eje X
103 M_X1 = mean(pks_X1)
104 M_X2 = mean(pks_X2)
105 M_X3 = mean(pks_X3)
106 M_X4 = mean(pks_X4)
107
108 % Promedio de valores pico de senales del eje Y
109 M_Y1 = mean(pks_Y1)
110 M_Y2 = mean(pks_Y2)
111 M_Y3 = mean(pks_Y3)
112 M_Y4 = mean(pks_Y4)
```

Calibración de Sensores

En esta sección se encontrarán las hojas de calibración correspondientes a las celdas de carga 1 a 5. Se identifica cada uno por un número grande en la esquina superior izquierda. Es necesario denotar que la celda 3 fue dañada durante las pruebas, por lo que fue reemplazada por la celda 5 para ejecutar la prueba con el dispositivo de vibración.

Información detallada

Esta sección contiene información detallada sobre las pruebas realizadas, pudiendo servir también como referencia al lector.

C.1. Barrido de frecuencias

A continuación se presentan las frecuencias que conformaron el barrido con el que se obtuvo la respuesta en frecuencia del sistema de medición de fuerzas. Se seleccionaron estas frecuencias en función de los puntos de interés detectados en un barrido de prueba, al hacerse evidentes frecuencias resonantes y al delimitarse el rango de operación. Los mismos valores fueron utilizados para ambos ejes.

Tabla C.1: Frecuencias que conforman el barrido.

Frecuencia [Hz]			
10	210	300	550
20	220	305	600
40	230	310	700
60	235	315	800
80	240	320	900
100	245	325	1000
110	250	330	1100
120	255	340	1200
130	260	350	1300
140	265	360	1400
150	270	370	1500
160	275	380	1600
170	280	390	1700
180	285	400	1800
190	290	450	1900
200	295	500	