



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA MECÁNICA – MECATRÓNICA

ESTUDIO DE CHATTER Y SU IMPACTO EN LA MANUFACTURA SUSTENTABLE

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
ING. EDUARDO ANGUIANO ANAYA

TUTOR PRINCIPAL:
DR. ÁLVARO AYALA RUIZ, FACULTAD DE INGENIERÍA

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD.MX. 2020



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Jurado Asignado:

Presidente: *Dr. Borja Ramírez Vicente*

Secretario: *Dr. Velázquez Villegas Fernando*

Vocal: *Dr. Ayala Ruíz Álvaro*

1er. Suplente: *Dr. González González Leopoldo A.*

2do. Suplente: *Dr. Ramírez Reivich Alejandro C.*

Ciudad de México, Ciudad Universitaria.

Tutor de Tesis:

Dr. Álvaro Ayala Ruiz

Firma

Agradecimientos

«Fue el tiempo que pasaste con tu rosa lo que la hizo tan importante».

– Antoine de Saint-Exupéry –

A mi mamá *Julia Anaya Martínez*, por ser el pilar que me sostiene y me impulsa a ser mejor.

A mi bella *Xóchitl Méndez Gutiérrez (amasijo de huesos)*, por tu cariño, por acompañar mi andar y por la manera en que abres mi mundo hacia otras maneras de observar y pensar.

Al *Dr. Álvaro Ayala Ruiz* por su paciencia y dedicación como mi guía en el desarrollo de este trabajo. Pero sobre todo, por su amistad y la transmisión de su saber.

Al *Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT)* por la beca otorgada para la realización de estudios de posgrado e investigación en la maestría.

A la *Universidad Nacional Autónoma de México* y a la *Facultad de Ingeniería* por su fomento a la educación e investigación.



“Por mi raza hablará el espíritu”.

Índice

Resumen	i
Objetivo	ii
Introducción	ii
Capítulo 1. Precedentes	1
1.1 Máquinas herramienta	1
1.2 Generalidades: maquinado (mecanizado)	11
1.3 Fresado	18
1.4 Perturbaciones del proceso de manufactura	21
Capítulo 2: Conceptos básicos	25
2.1 Conceptos de vibración	25
2.2 Vibraciones mecánicas	27
2.3 Vibración en el proceso de fresado	31
2.4 Análisis de chatter	34
Capítulo 3: Estudios preliminares	36
3.1 Clasificación y métodos	36
Capítulo 4: Caso de estudio	45
4.1 Análisis en tiempo real y para la toma de decisiones	45
Conclusiones	68
Referencias	69

Resumen

En el país la industria de la manufactura, se concentra en pequeñas y medianas empresas que se distribuyen a lo largo del territorio nacional, las cuales se preocupan por sobrevivir, pasando por alto la formalización del conocimiento. El sector automotriz representa el 17.7% de toda la industria manufacturera y la aeroespacial aporta el 11.8% de esta, lo que representa el 29.5% de la producción manufacturera total en México. De este modo, los cambios en las tecnologías de fabricación avanzadas, así como en la economía de la fabricación y su sustentabilidad, destacan el hecho de contar con intervenciones significativas para el desarrollo de nuevos y mejores productos.

Así pues, dado que las pequeñas y medianas empresas de manufactura en México continúan presentando problemas para cubrir de forma adecuada las necesidades del cliente, y a que la diseminación del conocimiento que se realiza de forma empírica del maestro al aprendiz, basándose principalmente en reglas heurísticas (reglas de dedo) y vivencias. Por otro lado, la industria 4.0 requiere un mayor nivel de automatización, así como, un mayor entendimiento de los procesos de manufactura tradicional e implementación de la manufactura avanzada. De este modo, los objetivos y requerimientos solicitados por el cliente tales como: estabilidad dimensional, rigidez estructural, apariencia, resistencia al impacto, resistencia química y térmica, aseguramiento de tolerancias para lograr ensambles y superficies de tipo A, es decir, vista al cliente; se ven directamente afectados por la calidad superficial, el desgaste de las herramientas y la baja productividad de los procesos de manufactura avanzada, provocados principalmente por la aparición de vibraciones autoexcitadas.

De este modo, en la literatura se reportan investigaciones sobre las vibraciones y éstas se dividen en tres áreas: predicción de chatter de forma analítica (offline), detección de chatter para modificación del proceso en tiempo real (online) y la eliminación de chatter en tiempo real. Así, se propone un procedimiento que permita combinar las áreas offline y online, con la idea de mitigar las consecuencias de las vibraciones autoexcitadas (chatter); a través de la combinación del análisis de señales en el dominio de la frecuencia, análisis de lóbulos de estabilidad y acabado superficial. Por lo cual, se presenta un caso de estudio para la manufactura de piezas con geometría libre, utilizadas en la fabricación de moldes para inyección de plástico, en una máquina CNC.

En donde, a través del método científico se explora la obtención de información que permita identificar las condiciones críticas de chatter y con ello, conocer las mejores condiciones de operación para el proceso. En virtud de lo anterior, se estableció una ventana de procesamiento que permite determinar con claridad las zonas de estabilidad y pronostica el acabado superficial de las piezas estudiadas. Logrando la obtención de productos con precisión entre IT1 e IT3 y que son repetibles para cualquier tipo de industria y dimensión, sin necesidad de modificar o interrumpir el proceso de producción.

Palabras clave: manufactura, fresado, chatter, lóbulos de estabilidad.

Objetivo

Encontrar la relación entre los parámetros de corte y el efecto de chatter para pronosticar el acabado superficial durante las operaciones de fresado por CNC en superficies libres.

Introducción

México produce una gran cantidad de productos manufacturados que se distribuyen en Norteamérica y alrededor del mundo, destacándose así, como el más importante en América Latina en cuestiones de manufactura. De este modo, el país concentra el 2.02% del comercio mundial según cifras del Banco Mundial. En 2018, las exportaciones del sector manufacturero mexicano sumaron 413,042.00 millones de dólares lo que representa cerca del 57.4% de las exportaciones en América Latina (Banco Mundial, 2019).

A esto debe añadirse que, México se posiciona como el octavo en actividades relacionadas a los procesos de manufactura a nivel mundial y que, la aparición de la industria 4.0 demanda la adaptación de los procesos de manufactura tradicionales a procesos de manufactura avanzada que provean de flexibilidad y robustez, a través de altos estándares de calidad en ingeniería y buen manejo de las materias primas dentro de los procesos de manufactura. Detonando así, cadenas de valor dinámicas que optimicen en tiempo real el funcionamiento de los procesos (Sandoval Rios & et al, 2016). De manera que la producción mexicana se incorpore a las cadenas de producción global.

Así pues, es posible encontrar procesos de manufactura en diversos sectores como: el farmacéutico, químico, alimenticio, electrónico, automotriz y aeroespacial por mencionar algunos. Cabe destacar que el sector automotriz representa el 17.7% de toda la industria manufacturera y la aeroespacial aporta el 11.8% de esta, lo que representa el 29.5% de la producción manufacturera total en México, siendo así, dos de las industrias que demandan condiciones específicas dentro de sus procesos (Barrera Franco & Pulido Morán, 2016).

Además, al realizar un comparativo con México y los Estados Unidos, el país proporciona alternativas de manufactura que disminuyen un 12.3% los costos de fabricación de autopartes, 16.3% la fabricación de componentes metálicos, 9.8% en la elaboración de componentes de precisión y 15.2% en la producción de insumos de plástico para la industria (Barrera Franco & Pulido Morán, 2016).

Estas cifras reflejan no solo el lugar que México ocupa en el comercio mundial, sino la relevancia del comercio exterior como un motor para el crecimiento de la economía mexicana. El comercio exterior ha sido un factor de crecimiento y desarrollo, sobre todo para aquellas regiones, sectores y empresas del país que se han podido integrar de manera directa o indirecta a esta actividad. A través del comercio internacional, la planta productiva ha podido integrarse a las cadenas de producción global donde se dan la mayor parte de los intercambios. No todos los estados y regiones han sido igualmente capaces de maximizar las oportunidades y los beneficios

que ofrece el comercio internacional, pues no todos han podido vincularse con las cadenas mundiales de manufactura (De la Mora, 2019).

De este modo, algunos de los procesos con mayor demanda son: la fundición, estampado, forja y maquinado. Y es justamente en los procesos de maquinado en los que se requiere de productos con especificaciones cada vez mayores y sumamente complejas (Barrera Franco & Pulido Morán, 2016). Es así como, reducir el tiempo de maquinado, incrementar la eficiencia en el proceso (mediante el control de parámetros base: profundidad y velocidad de corte, etc.), cumplir con las tolerancias geométricas, el aspecto de las piezas, incrementar la flexibilidad (al limitar el número y duración de procedimientos de remanufacturado), maquinado de materiales con amplio rango de propiedades físicas y mecánicas, alta repetibilidad de las condiciones de maquinado y la reducción de errores humanos, se vuelve esencial para dichos procesos (Hamrol & et al, 2018).

En el mayor número de los procesos para la transformación de los materiales hace uso de equipos con elementos mecánicos, eléctricos, electromecánicos o una combinación de estos. Uno de estos sistemas es la máquina de control numérico. Dicha maquinaria hace uso de la remoción de material mediante herramientas de corte que a altas revoluciones desbastan los materiales, por lo que la eficiencia de las operaciones de maquinado puede mejorarse al proporcionar información relacionada con el proceso de corte y la unidad de control que determina los movimientos relativos entre el herramental y la pieza de trabajo (Kumar & et al, 2018). En consecuencia, si no se tiene un adecuado control de los parámetros pueden ocasionarse problemas de calidad que afectan tanto a la maquinaria como a las piezas fabricadas.

Es así como, el acabado superficial representa un indicador clave sobre el desempeño de los equipos y por ende de la aceptación o rechazo de un producto al representar aproximadamente el 93% de la operación total durante la fabricación de una pieza. Y es que el simple hecho de no cubrir adecuadamente las características finales de lo requerido por el cliente garantiza el incremento de costos en el proceso de manufactura. Dichos costos se ven reflejados cuando se requiere de postprocesos o retrabajos de las piezas, cuando se tienen desperdicios considerables de la materia prima o se requiere de tiempos extras, entre otros (Vargas Henríquez & et al, 2014).

De este modo, la adaptabilidad de los procesos de manufactura puede verse mermada cuando las propiedades y características geométricas de las piezas a manufacturar no se obtienen de acuerdo con las especificaciones. Sobre todo, cuando la integridad de las superficies es crítica como en el caso de la industria aeroespacial o bien, para la economía de los procesos como en la industria de los moldes para inyección de plásticos. De ahí que, conocer la influencia de cada parámetro relacionado con el proceso junto con sus interacciones permite constatar áreas de oportunidad dentro de las operaciones de mecanizado (Lauro, Brandão, & Ribeiro Filho, 2015).

Así pues, dada la flexibilidad de los sistemas de maquinado, el problema de inestabilidad por chatter, es siempre inevitable durante el proceso de maquinado (Qin, Tao, & et al, 2020). De ahí que, una de las variables más significativas para monitorearse dentro de los procesos de manufactura sean las vibraciones. Debido a que, el efecto de estas se relaciona de manera directa con las características finales de las piezas, la vida útil de los herramientas de la maquinaria, el

consumo energético, etc. Y, además, el análisis de dicha variable puede ser separado en componentes que se establecen dentro de un determinado rango de frecuencias en el que puede diferenciarse de las proporciones síncronas y asíncronas dentro del proceso. Permitiendo así que, la información obtenida a través de dicha variable permita correlacionar de mejor manera los elementos que integran el proceso con el fin de garantizar la satisfacción de las necesidades del cliente (Klein, 2017).

Entonces, el proceso de monitoreo durante el maquinado constituye la base para determinar el desempeño y condiciones de la maquinaria que permitirán el cumplimiento del objetivo de manufactura deseado. De esta manera el acabado superficial, la dureza y las condiciones de monitoreo de la maquinaria se vuelven objetivos importantes tanto para el cliente como para el proceso de producción en sí. La supervisión de la maquinaria se compone entonces tanto del desempeño como de las condiciones de la maquinaria, donde el desempeño se ve reflejado en los objetivos establecidos por el cliente y las condiciones de monitoreo en los objetivos u especificaciones establecidas para la producción de un objeto (Klein, 2017).

Así mismo, las condiciones de monitoreo de la maquinaria dependen de las vibraciones en y dentro de la maquinaria. Y, en suma, el acabado superficial de una pieza dependerá no solo de los parámetros del proceso sino también de las vibraciones generadas por el herramienta utilizado ocasionando así, desviaciones considerables por sobre los valores normales de operación. Por lo tanto, el efecto de las vibraciones en la maquinaria y sus elementos se ha vuelto de vital importancia para la industria manufacturera (Ratnam, 2016).

El monitoreo y análisis de vibraciones puede realizarse con base en un periodo de operación de la maquinaria o mediante el análisis del estado actual de los elementos de la maquinaria. El análisis de vibraciones basado en un periodo de operación se centra en el seguimiento de cinco pasos: condición inicial del elemento de análisis; monitoreo; detección; análisis y recomendaciones. Por el contrario, para el análisis de vibraciones en intervalos determinados se requiere del monitoreo de frecuencias en todos sus rangos (estrecho y ancho de banda) (Vikram & et al, 2016).

La información obtenida del análisis de las frecuencias en banda ancha permite *diagnosticar* pues se derivan de las extracciones de material realizadas durante la operación de mecanizado pudiéndose utilizar como clasificador de los modos de falla, mientras que el análisis de las frecuencias de banda estrecha puede ser considerado como un *pronóstico*, pues derivado de la operación realizada por la maquinaria puede obtenerse el grado de desgaste de esta. De esta manera, contar con un diagnóstico de vibraciones y un pronóstico de la máquina herramienta es útil para el establecimiento de un mecanismo de control que determine anticipadamente el estado de la maquinaria (Vikram & et al, 2016).

Para lograr una precisión adecuada, es necesario tener en cuenta las influencias mencionadas anteriormente y cuando sea necesario, minimizarlas, compensarlas o al menos tener una estimación de las mismas en términos de magnitud con el fin de garantizar las características de calidad, funcionalidad y costo solicitadas. El proceso de fresado solo es estable para ciertas

combinaciones de velocidad y profundidad de corte. Cuando se exceden los rangos de estabilidad se producen fuertes vibraciones que afectan la apariencia de las piezas fabricadas. De ahí que, el punto característico en que se presenta este fenómeno debe ser conocido; de lo contrario, el proceso puede caer en rangos de desempeño menores a lo esperado.

El rasgo característico y determinante sobre la formación de chatter son las huellas dejadas por las herramientas durante sus operaciones (Zatarain & et al, 2006). La herramienta básica para el análisis de chatter se conoce como lóbulos de estabilidad, la cual relaciona la profundidad de corte a la cual el efecto de las vibraciones puede incidir sobre las operaciones de maquinado como función de la velocidad de rotación del husillo. En orden de determinar los lóbulos de estabilidad, primero, es necesario conocer las propiedades dinámicas de la máquina herramienta y la pieza de trabajo a través de los elementos de adquisición de señales como una función de respuesta en frecuencia (FRF, por sus siglas en inglés).

De este modo, el método combinado de detección de vibraciones mediante acelerómetros y los lóbulos de estabilidad (SLD) permitirán la obtención de un modelo que aproxima al modelo físico para así predecir su comportamiento. La idea principal sobre el uso del diagrama de estabilidad, se centra en el hecho de que los problemas de chatter pueden ser resueltos a través de la optimización de parámetros de proceso como la profundidad de corte (a) y la velocidad de giro del husillo (N) respectivamente. El SLD se construye utilizando un modelo alimentado con cuatro entradas distintas: los coeficientes de corte o las fuerzas específicas que describen el proceso de corte, los parámetros dinámicos del sistema y los parámetros del proceso, así como, la geometría de la herramienta (Ahmadi & Altintas, 2014).

Toda vez que se tiene la información de las características críticas de la vibración y las regiones de estabilidad para las operaciones, se propone la combinación de estas técnicas con la finalidad de generar una ventana de operación adecuada a las necesidades de un proceso en particular. De manera que con base en los parámetros proporcionados por el fabricante de las herramientas se logre determinar una ventana más amplia, que podría brindar mejores recomendaciones para las características de acabado superficial y sustentabilidad de las operaciones. Generando así, las características de geometría y apariencia deseadas en el menor número de operaciones posibles y, por ende, proporcionar información objetiva y con certidumbre.

La ventana de estabilidad para las operaciones se convierte entonces en una herramienta útil que garantizará las mejores condiciones para la obtención del acabado superficial deseado en piezas características de la industria metalmecánica enfocadas al sector automotriz y aeroespacial. De igual forma, contribuye a contar con un instrumento visual que de forma sencilla y clara permita identificar las zonas en las que se tendrán zonas de chatter y así poder evitarlas. En suma, también se identifican las regiones en que puede obtenerse un acabado de superficie que garantice los requerimientos técnicos de las piezas sin necesidad de hacer uso de probetas, así como, las regiones en que esta calidad puede verse empobrecida. De este modo, con la información establecida puede tomarse un curso de acción adecuado para el manejo de las operaciones del proceso.

Capítulo 1: Precedentes

«El esqueleto de la ciencia son los hechos, pero los músculos y los nervios son el significado que se les confiere, y el alma de la ciencia son las ideas».

– Dr. Ruy Pérez Tamayo –

1.1 Máquinas herramienta

Contexto del maquinado

Piezas elaboradas a partir de hueso o piedra fueron las primeras formas de herramientas de corte utilizadas por el hombre. Sin embargo, los materiales empleados para la fabricación de las piezas no satisfacían de la mejor manera las necesidades presentes, por ello, se buscaron mejores materiales para la realización de herramientas. Con la búsqueda de los nuevos materiales, también se exploraron nuevos y mejores métodos de corte.

Este proceso de búsqueda y exploración entre materiales y métodos ha sido continuo y se da principalmente cuando las técnicas existentes no son adecuadas para la obtención de las piezas deseadas. Tal fue el caso de, el uso de la acción de corte para dividir un objeto en partes; la cual habría sido la primera acción de corte. El uso de herramientas con forma de cuchilla o en forma de cuña habrían facilitado el trabajo de corte.

Sin embargo, el uso de este tipo de instrumentos tan simples no garantizaba la obtención de los objetos con precisión y exactitud. Por lo tanto, se optó por el empleo de una operación de corte que permitiera controlar la cantidad de material a remover. Dicha labor de corte se conoció como cizallado (desbarbado) y a partir de ella se logró el control preciso de la profundidad de corte para eliminar secciones delgadas de material, produciendo así, piezas con la forma y tamaño deseados (Kumar & et al, 2018).

Tras el paso del tiempo y con la experiencia adquirida, se estableció que el movimiento relativo de la herramienta con respecto de la pieza de trabajo es responsable de la precisión obtenida en la fabricación de los objetos. Por ende, se requirió que las máquinas pudieran controlar la posición relativa de la herramienta respecto del objeto de trabajo para garantizar la obtención de los componentes con la forma y tamaño deseados. La primera evidencia del desarrollo de máquinas se reflejó en el taladro de arco y el torno; y las herramientas utilizadas se fabricaron con materiales como el cobre y el bronce.

Fue hasta 1772, cuando el inventor John Wilkinson desarrolló la máquina mandrinadora para el maquinado de partes relativamente grandes. Dicho dispositivo fue utilizado para la realización

de agujeros en piezas cilíndricas para la primera máquina de vapor. El material de construcción para la herramienta de corte utilizada fue acero con alto contenido de carbono.

Posteriormente, en 1792 Henry Maudslay desarrolló el torno de tornillo. La máquina desarrollada tenía un portaherramientas deslizante y era más eficiente que las máquinas desarrolladas con anterioridad. A lo largo de la revolución industrial se dio el desarrollo de un gran número de máquinas (Kumar & et al, 2018).

Esto propició que desde mediados del siglo XIX y hasta finales de siglo se dieran distintas gamas de sistemas de mecanizado. Entre los sistemas desarrollados controlados mediante levas se encuentra el torno de cabrestante y el torno de torreta, entre otros. Este tipo de máquinas permitía altas tasas de producción, lo que facilitaba la producción en masa de objetos.

Con los avances obtenidos en el desarrollo de las máquinas se logró la obtención de piezas con un tiempo y costo de producción relativamente menor. Esto fue posible a través de la producción de sistemas de mecanizado automatizado con una amplia gama de elementos de configuración. Los sistemas podían ser mecánicos, eléctricos, electromecánicos o una combinación de ellos. Uno de los primeros sistemas combinados de mecanizado fue la máquina de control numérico. El término numérico se justifica en el sentido de que la información proporcionada para controlar los parámetros de operación de la máquina se alimenta a través de coordenadas numéricas.

Por otra parte, los avances en el campo de los materiales han traído consigo el desarrollo de materias primas capaces de soportar temperaturas de funcionamiento y tensiones elevadas. El procesamiento de los materiales con características mecánicas y físicas mejoradas es una tarea difícil, de manera que, se necesita un constante desarrollo de técnicas y máquinas capaces de manufacturar piezas con diversas propiedades. El desarrollo y progreso de los avances tecnológicos ha llevado al desarrollo de sistemas de mecanizado que son altamente sofisticados y producen piezas con mayor precisión y exactitud (Kumar & et al, 2018).

¿Qué es manufactura?

La tecnología según Dziak, es el empleo de la ciencia para proveer a la sociedad y a sus individuos aquellos objetos que necesitan o desean (Dziak, 2020). Nuestras vidas se encuentran influenciadas de manera directa o indirecta por la tecnología, puesto que, desde un bolígrafo, dispositivos móviles, laptops, juegos, máquinas de diagnóstico médico, transporte, etcétera. Mantienen una relación común que se centra en el hecho de que todos han sido diseñados y manufacturados, y no estarían disponibles de no ser por la existencia de los procesos de manufactura. La manufactura es el factor esencial que hace posible a la tecnología y por tanto es importante también en lo histórico y económico.

De acuerdo con Zimmer, la manufactura se define como la actividad mediante la cual se realiza la transformación de la materia prima para la obtención de un producto a través de un

proceso industrial (Zimmer, 2020). La manufactura puede entonces definirse en dos contextos: uno tecnológico y otro económico. En el contexto tecnológico, la manufactura es la aplicación de procesos físicos y químicos que se utilizan para la modificación de la geometría, propiedades o características físicas de un material de inicio proporcionado para la fabricación de piezas o productos; así como, para el ensamble de piezas múltiples para fabricar productos.

Los procedimientos para llevar a cabo la manufactura involucran una combinación de máquinas, herramientas, energía y trabajo manual (Fig. 1.a). Generalmente, la manufactura se ejecuta como una secuencia de operaciones donde cada una de éstas aproxima a la materia prima al estado final deseado (Groover, 2014). En el ambiente económico, la manufactura es la transformación de los materiales en artículos con valor añadido a través de una o más operaciones de procesamiento o ensamblado (Fig. 1.b).

En este caso la manufactura agrega valor al cambiar la forma o propiedades de la materia prima, o bien, al realizar combinaciones de distintos materiales de diversas características. Un ejemplo de lo anterior es cuando, el mineral de hierro se convierte en acero, añadiéndole valor; de igual forma cuando la arena se transforma en vidrio y cuándo el plástico se modela en una forma compleja. De esta manera, la materia prima habrá adquirido valor agregado por medio de las operaciones de manufactura ejecutadas en él.

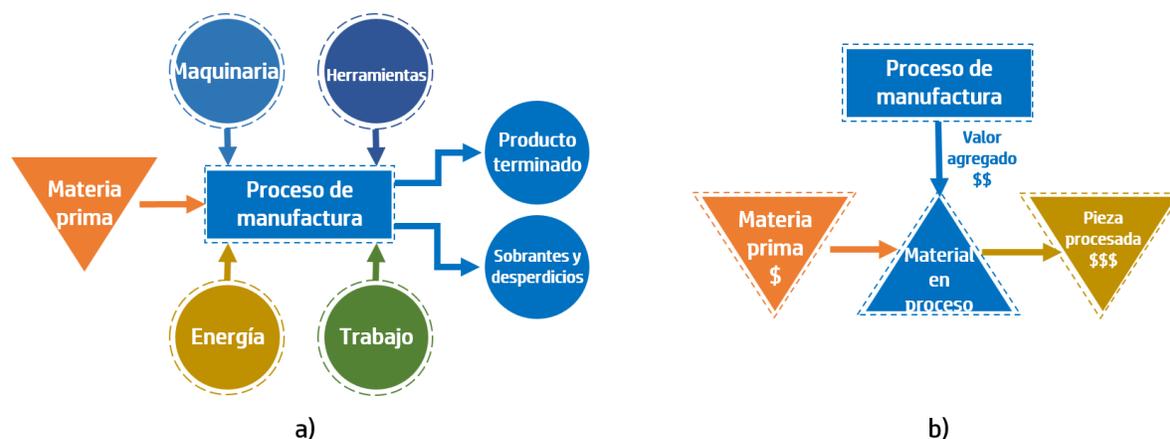


Figura 1. Manufactura como proceso técnico a) y económico b) (Groover, 2014).

Procesos de manufactura

Un proceso de manufactura se realiza a través de una o más operaciones, dentro de la secuencia de pasos necesarios para realizar la transformación del material en un producto final. Las operaciones de manufactura (Fig. 2) se llevan a cabo con respecto a la secuencia definida para el alcance de la geometría establecida en las especificaciones de diseño. De este modo, se distinguen tres categorías de operaciones de procesamiento (Groover, 2014):

1. *Operaciones de formado*: alteran la geometría del material de trabajo al aplicar calor, fuerzas mecánicas o una combinación de estas. Procesos comunes en esta categoría son la fundición, forja y el maquinado.
2. *Operaciones de mejoramiento de una propiedad*: agrega valor a la materia prima mediante el mejoramiento de las propiedades mecánicas o físicas de los materiales sin cambiar su forma (por ejemplo, el tratamiento térmico).
3. *Operaciones de procesamiento de una superficie*: se efectúan con el fin de limpiar, tratar, recubrir o depositar material sobre la superficie externa de la materia prima (ejemplo de ello son el cromado y el pintado).

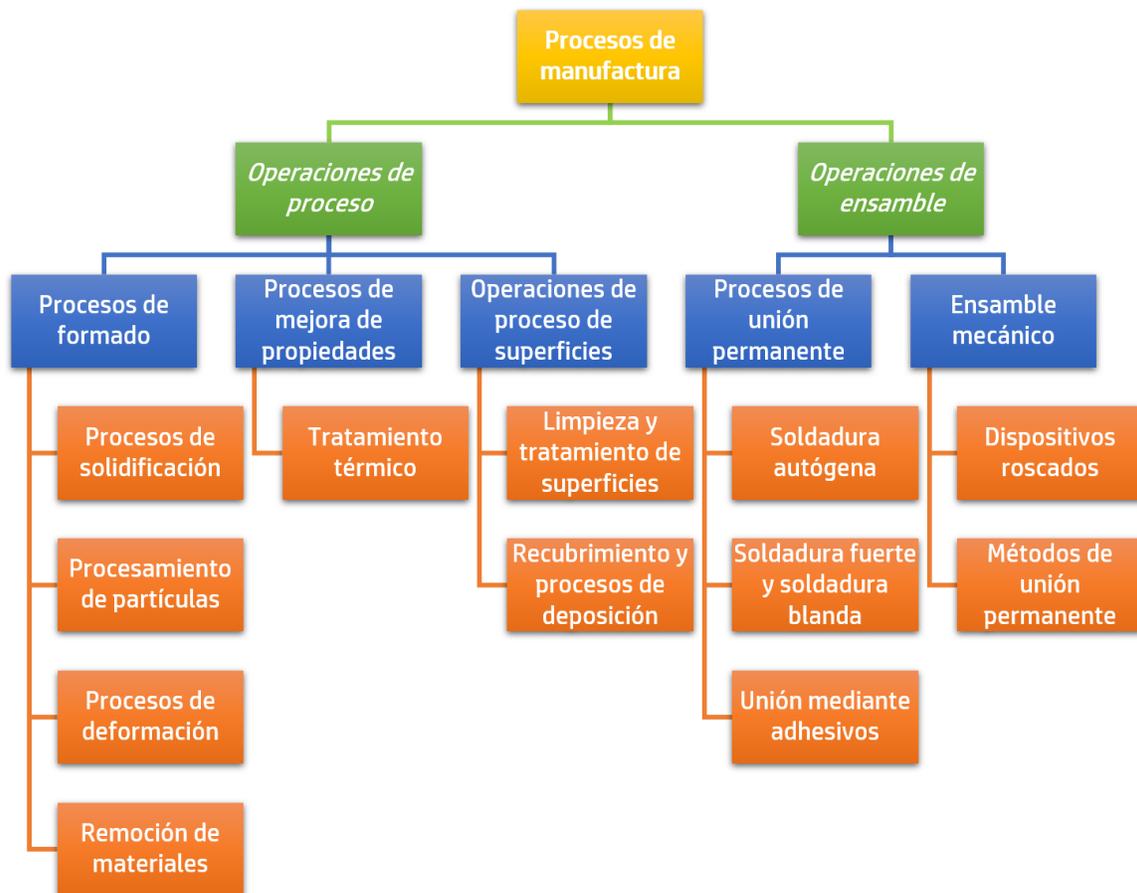


Figura 2. Clasificación de los procesos de manufactura (Groover, 2014).

Triángulo del proceso de manufactura

Cada proceso posee capacidades particulares que pueden ser determinadas mediante rangos de información numérica o una lista de parámetros cualitativos. Por ejemplo, el área de trabajo típica que un proceso puede controlar, o los materiales que puede procesar, son claramente atributos importantes del proceso. Hacer coincidir los requerimientos de las partes con el proceso indicado es la parte medular de la manufactura.

De modo que, contar con información del o los atributos de proceso es un buen punto de partida, pero solo es viable si las cualidades de los materiales y las formas de procesamiento son idénticas a todos. Lamentablemente, esto no se cumple y por ende se tienen limitaciones significantes, debido a que los rangos de elección y comparación pueden ser muy amplios. Además, las características de los atributos no son independientes entre sí; por ejemplo, las piezas más grandes o los materiales más resistentes requieren equipos más potentes con condiciones de precisión elevada o procesos específicos.

De manera que, la selección adecuada de los procesos para garantizar economía con un estándar de calidad que cubra las especificaciones de una pieza de trabajo, es un problema de optimización, que involucra compensaciones como: modificación de operaciones, rangos de tolerancia, rugosidad, desgaste de herramientas, energía consumida, impacto ambiental, por mencionar algunas. Por lo tanto, es crucial reconocer que los atributos de proceso no son cantidades fijas sino una combinación de variables interrelacionadas. Dada la gran diversidad de materiales, piezas y procesos, el esfuerzo puede parecer en primera instancia abrumador (Tempelman & et al, 2014).

Por ende, el desarrollo de operaciones y procesos precisa de un modo para *gestionar el conocimiento*, generando un enfoque estructurado que permita clarificar las condiciones necesarias de un proceso. Para lograr esto, en el presente trabajo se definen tres características esenciales que se basan en la selección tradicional de procesos mostrada por Tempelman (Tempelman & et al, 2014): función, calidad y costo; dichas categorías conforman un *triángulo del proceso de manufactura* (Fig. 3). De este modo, las diferencias entre los métodos de fabricación pueden ser expresadas a través de los parámetros clave del proceso.

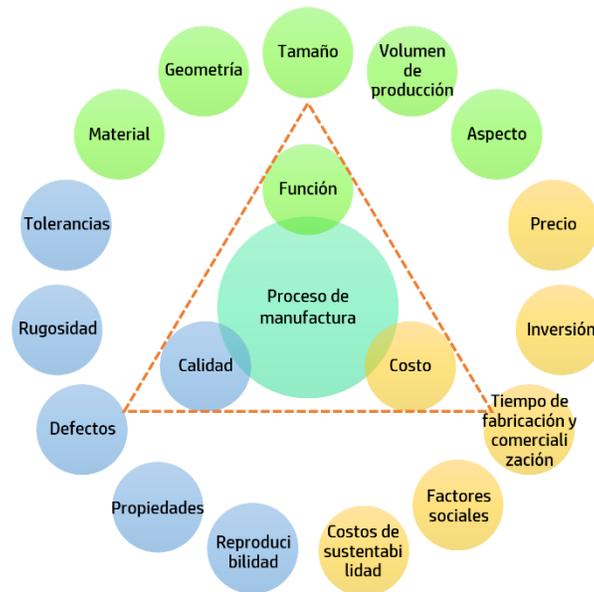


Figura 3. Atributos dominantes de un proceso según su función, calidad y costo (Tempelman & et al, 2014).

El triángulo muestra cinco atributos clave asociados a cada una de sus esquinas por lo que se interrelacionan quince cualidades que proveen la estructura necesaria para abordar cualquier proceso de manufactura. Los atributos funcionales en color verde (Fig. 3) son los materiales, geometrías, y tamaño de las piezas a manufacturar o el producto, si está completamente terminado. Posteriormente, está el volumen de producción, es decir, el requisito para producir no una, sino un cierto número de piezas.

El volumen de producción se origina principalmente de la economía del proceso, pero la experiencia y la información previa permiten que se considere como un atributo funcional independiente sin necesidad de hablar de costos reales. Estos cuatro atributos están bien establecidos por los requerimientos del cliente y pueden definirse objetivamente. Sin embargo, hay elementos funcionales que no pueden definirse fácilmente y que se relacionan con el aspecto final de las piezas. Este término en general captura el color, acabado superficial (rugosidad y microgeometría de las piezas), y aquello que se capta a través de la visión. Pocos procesos pueden abordar los cinco aspectos funcionales en una sola iteración (Tempelman & et al, 2014).

Los atributos de calidad en color azul (Fig. 3) comienzan con la tolerancia y rugosidad. Las tolerancias son las desviaciones permisibles dentro del proceso sobre el tamaño de los objetos. La rugosidad se refiere a las características de superficie de las piezas y que coloquialmente puede considerarse como lisa o rugosa; aunque las mediciones tienen un orden de magnitud de micras. Los defectos dañan la apariencia de los componentes, pudiendo ser, grietas, hoyos o marcas en la superficie que pueden o no apreciarse a simple vista.

El siguiente objetivo de calidad es conseguir las propiedades deseadas del material. Aquí es vital apreciar que el proceso no solo lleva a la materia prima a una forma requerida, sino que en la mayoría de las veces también se afectan de manera simultánea las propiedades del material final. Esto es particularmente cierto, cuando se modifican las propiedades mecánicas de los materiales; de hecho, el tratamiento térmico, permite modificar este tipo de propiedades.

Así pues, los procesos de automatización garantizan que las piezas se produzcan con calidad constante dentro de una secuencia del proceso (reproducibilidad). Como antes, los dos primeros atributos: tolerancia y rugosidad, se encuentran bien definidos y pueden medirse objetivamente, mientras que para el resto existe cierta dificultad técnica. Ya que, la aparición de defectos, las propiedades del material y la variabilidad de ambos dependen de forma compleja del material, el proceso, y los requerimientos establecidos para su fabricación (Tempelman & et al, 2014).

Finalmente, en color naranja se encuentran los cinco atributos de costo (Fig. 3). Lo más importante es el precio de la pieza, que incluye las aportaciones obtenidas de los materiales y consumibles utilizados, la depreciación de todos los costos de capital dedicados (como herramental, moldes y matrices), el transporte, embalaje, y costos relacionados con el tiempo; este último, es un híbrido complejo de costos cobrados por hora (mano de obra, energía, costos generales, más una parte del capital del equipo, que generalmente se amortiza en un período de, por ejemplo, cinco años). Pero una contribución es lo suficientemente influyente dentro de la elección de un proceso; se trata de la inversión.

Eventualmente, el atributo de inversión puede impulsar la elección de un proceso por sí solo, especialmente cuando el volumen de producción es incierto. Hay tres atributos de costo que son más difíciles de precisar, dentro de los cuales se encuentra el tiempo de fabricación y comercialización, es decir, el tiempo requerido para pasar de la materia prima en bruto a la introducción de los objetos con características finales. Es un importante impulsor en la elección del proceso de fabricación, ya que se demandan ciclos de vida del producto cada vez más cortos (Tempelman & et al, 2014).

Por último, lo más difícil son los factores sociales y los costos de sustentabilidad que se relacionan directamente con el concepto de desarrollo sostenible y cuya evolución es creciente. En resumen, el triángulo del proceso de manufactura captura el enfoque que se utilizará para explorar las características determinantes en los procesos de formado y específicamente en la remoción de materiales a través del arranque de viruta. Por ello, también es posible describir la información distribuida en el triángulo a través de (Fig. 4):

- *Atributos*: es aquella característica diferencial que posee la pieza de trabajo como rasgo distintivo de otra similar y cuyo proceso de elaboración y condiciones finales cumplen con las normas establecidas en el proceso.
- *Características*: son las propiedades inherentes a un objeto que le confieren capacidad para satisfacer necesidades implícitas (evidentes y esenciales, por ejemplo, la inocuidad de las piezas de un producto o el beneficio para la salud) o explícitas (que cumpla con el detalle dispuesto). Es decir, que desde la elección de la materia prima hasta la obtención de las piezas finales se respeten las especificaciones y la relación funcional de las piezas fabricadas.
- *Parámetros*: son herramientas cuantitativas ligadas a un objetivo concreto, que permiten medir la evolución y el desempeño de los procesos.

Al realizar dicha distinción se evidencia la importancia de la cuantificación de los parámetros dentro del desarrollo de los procesos.

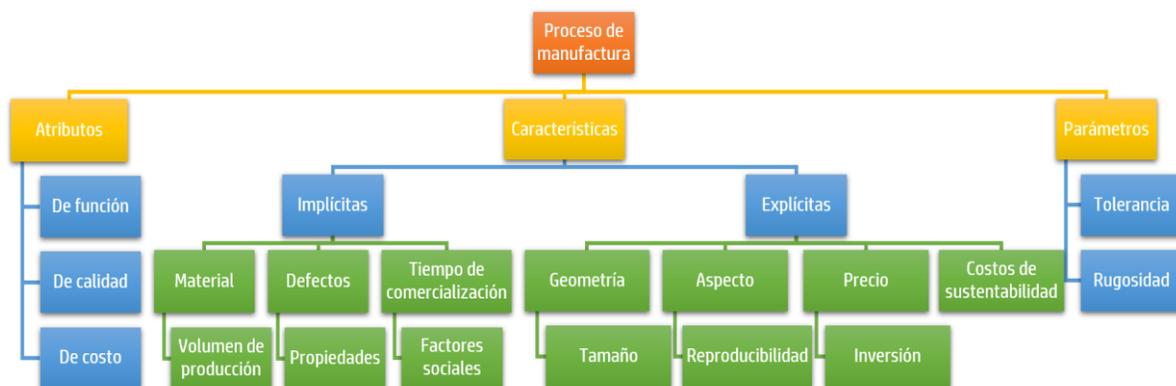


Figura 4. Distinción entre atributos, características y parámetros a partir del “triángulo del proceso de manufactura”.

El sector manufacturero representa el 61% (INEGI, 2019) de la inversión extranjera directa en nuestro país. De este modo, los cambios en las tecnologías de fabricación avanzadas, así como en la economía de la fabricación, destacan el hecho de contar con intervenciones significativas para el desarrollo de nuevos y mejores productos. Por lo que, a medida que las empresas emplean tecnologías de fabricación avanzadas para crear fábricas “inteligentes” y conectadas, la fabricación del siglo XXI se abre de manera más efectiva hacia el camino de la competitividad y generación de productos que concuerden con las especificaciones de los procesos. Los países y regiones de todo el mundo están invirtiendo fuertemente en tecnologías de fabricación avanzadas debido a su importante vínculo con la innovación y el desarrollo económico en general.

El interés creciente en temas de manufactura alrededor del mundo se encuentra ligado a los cambios tecnológicos capaces de reconfigurar los aspectos de los procesos de fabricación y con ello generar un mayor valor económico. Las tecnologías de producción avanzada no solo están cambiando la ecuación sobre los costos de fabricación, sino que, se están convirtiendo en la parte medular de la innovación de nuevos productos, procesos y servicios. Este tipo de tecnologías es fundamental para el desarrollo de procesos y productos más complejos. De este modo, la fabricación avanzada también requiere de proximidad con la investigación y sus capacidades de desarrollo, permitiendo su interrelación con los procesos de manufactura (Reynolds, 2017).

Tendencias de los procesos de manufactura avanzada

La fabricación avanzada promueve la manufactura de bajo costo que hace uso de tecnologías de la información (TI) en sus productos o procedimientos, y/o el empleo de mano de obra con habilidades que destacan entre las tradicionales. De este modo, el uso de TI combinadas con la maquinaria de los medios de transformación define la manufactura avanzada y conduce a sistemas con un grado mayor de automatización, inteligencia, eficiencia y sostenibilidad en los procesos. Así pues, se identifican ocho categorías clave de tecnologías de fabricación avanzadas emergentes y potenciales, las cuales incluyen (Reynolds, 2017):

1. *Industria pesada y de alta tecnología:* procesos de fabricación para los sectores aeronáutico, automotriz, médico, metalmecánica y mecatrónica. Hacen uso de instrumentos como el control asistido por computadora para lograr la maduración de procesos que desarrollan confianza y credibilidad de estimaciones en términos de calidad, capacidad, costos, tiempos y recursos.
2. *Nanotecnología de materiales y superficies:* síntesis y estructuración de materiales funcionales y multifuncionales a nanoescala y microescala desde cero; los materiales no existen en la naturaleza y, por lo tanto, no tienen contrapartes directas en el mundo natural. Las aplicaciones biomédicas como las endoprótesis vasculares (stents) implantables están habilitadas por dicha tecnología.

3. *Ingeniería aditiva y de precisión*: procesos de fabricación a través de la deposición de capas de material para la generación de formas tridimensionales complejas. Esto permite la impresión 3D y el prototipado rápido en una variedad de materiales como el plástico, metal, hormigón, entre otros. Los implantes dentales y médicos hacen uso de dichas técnicas.
4. *Robótica y automatización adaptativa*: diseño innovador, uso y adaptabilidad de robots y equipos en los procesos de fabricación que pueden reemplazar o aumentar el trabajo humano durante la producción, especialmente cuando se requiere de alta precisión, estandarización, tareas repetitivas o grandes fuerzas y pares.
5. *Electrónica de nueva generación*: circuitos avanzados que utilizan materiales sin silicio, procesos y sustratos flexibles, potencialmente orgánicos. Esto permite la implementación de la “electrónica impresa” en la ropa, papel u otros sustratos flexibles para dispositivos portátiles o empaques de productos.
6. *Fabricación continua de productos farmacéuticos y biomanufactura*: el proceso de fabricación continua de moléculas pequeñas, así como, la transformación de células y organismos en fábricas programables, lleva a reducir el tamaño de las plantas de fabricación de productos químicos en varios órdenes de magnitud.
7. *Diseño y gestión de cadenas de suministro*: planificación y gestión de redes grandes de proveedores distribuidos en cadenas de múltiples niveles que permiten una distribución flexible de componentes y productos cada vez más descentralizados. Esto implica la gestión de la manufactura basada en la web.
8. *Manufactura sustentable*: nuevos procesos de fabricación y recuperación que minimizan el uso de energía, reciclan materiales y reducen los desechos y las emisiones. Con la escasez y la posible monopolización de algunos materiales (por ejemplo, elementos de tierras raras), así como, las preocupaciones medioambientales, esto se ha convertido en un lente importante a través del cual diseñar o mejorar los procesos de fabricación.

Los efectos de estas siete tecnologías emergentes en manufactura pueden apreciarse en el comparativo entre la manufactura tradicional y la manufactura avanzada (Fig. 5).

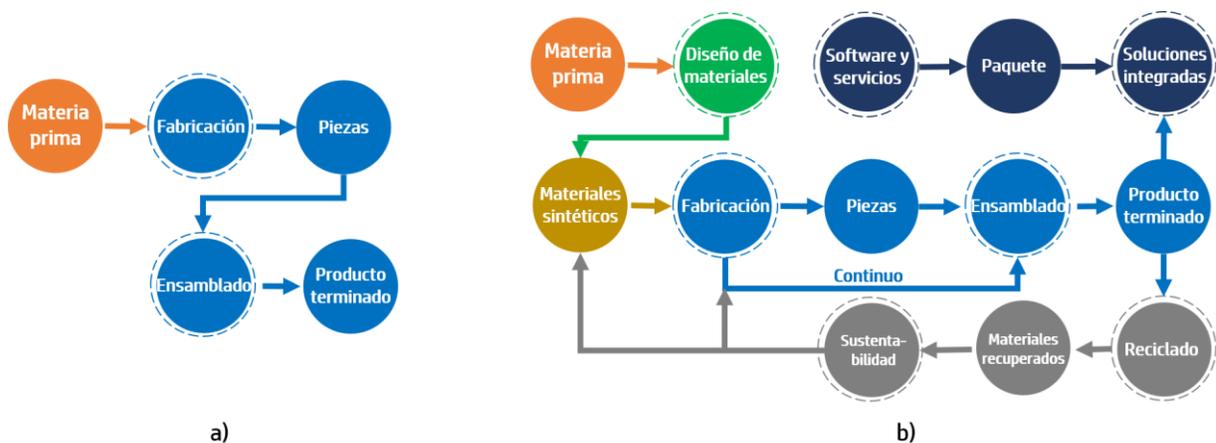


Figura 5. a) Proceso de manufactura tradicional y b) proceso de manufactura avanzada.

En el pasado, la fabricación tenía cuatro etapas principales que operaban linealmente desde la obtención de la materia prima hasta la generación del producto final. Por el contrario, hoy por hoy, la fabricación ha evolucionado. Las materias primas a menudo pueden reemplazarse por materiales sobre diseño.

La fabricación y ensamble de componentes se incrementa debido a la introducción de sistemas eficientes que permiten obtener lotes de producción de manera continua en donde los errores se minimizan. Las piezas fabricadas dejan de ser solo objetos físicos al momento de proporcionar soluciones integradas que involucran al producto con paquetes de servicio y software. Finalmente, la sustentabilidad y las oportunidades de reutilizar o recuperar los materiales requiere de procesos capaces de facilitar dichas tareas (Reynolds, 2017).

Visto como un todo, los procesos de manufactura se vuelven mucho más complejos y, sobre todo, pierden la linealidad con que se llevaban a cabo. Lo que trae consigo ventajas para la reducción de los tiempos y costos de fabricación, así como, la mejora de calidad de las piezas fabricadas.

Industria 4.0

Las tendencias en manufactura avanzada pueden comprenderse mejor en el contexto de la llamada cuarta revolución industrial o industria 4.0. Dicha revolución se basa en tres etapas previas al desarrollo industrial: (1) *mecanización* a través del poder del agua y el vapor a finales del siglo XVIII; (2) la *electrificación* que apoyaba la producción en masa a fines del siglo XIX; y (3) *automatización* realizada a través de la tecnología de la información y la electrónica a partir de la década de 1970. De esta manera, la cuarta revolución se centra en aplicar las tecnologías de la automatización para crear sistemas capaces de interrelacionarse entre sí a través del procesamiento de una gran cantidad de información. Permitiendo el análisis y retroalimentación de la información en los procesos de producción y a través de ello mejorar su rendimiento y productividad (Reynolds, 2017).

Así pues, de acuerdo con datos de la Secretaría de Economía (2020) las exportaciones de nuestro país alcanzan un 71%, y las importaciones un 52%, ello denota la integración que se tiene con otras naciones y sobre todo con América del Norte a partir del Tratado de Libre Comercio (TLC) por lo que existen múltiples espacios para la diversificación de los procesos actuales. Además, México tiene firmados tratados de libre comercio con más de 40 países, por lo que, la diversificación comercial debe ser de calidad y responder a las demandas presentes. De modo que, contar con la integración de estas nuevas tecnologías en los procesos de manufactura avanzada contribuirá directamente al impulso del sector y sus correlaciones.

De este modo el país ha incursionado satisfactoriamente en el mercado internacional, gracias a su alto nivel de competitividad en el ramo de la manufactura. Y es que México ha pasado de ser un exportador exclusivo de petróleo a caracterizarse por tener industrias que elaboran diversos productos de exportación. Acorde a lo anterior, se ha puesto interés constante en el

desarrollo de una industria más competitiva y dinámica que permita el fortalecimiento de los mercados tanto internos como externos, permitiendo así el desarrollo de cadenas productivas de valor (SE, 2020).

Ciertamente, la industria 4.0 proveerá de flexibilidad y robustez, junto con los más altos estándares de calidad en ingeniería, administración, fabricación, operaciones y logística de procesos. Se detonarán cadenas de valor dinámicas, optimizadas en tiempo real y con organización automatizada, que considerará diversas variables como el uso de los recursos, disponibilidad, calidad, innovación, costos, y demanda de los mercados. Por ello, este cambio de paradigma representa una ventana de oportunidad para México con un potencial considerable, ya que se garantizaría la convergencia de sectores estratégicos ampliamente competitivos como el aeroespacial, automotriz y médico.

En suma, la manufactura avanzada es uno de los eslabones más importantes para el desarrollo de la competitividad industrial de una nación. Debido a su fuerte interconexión con el resto de los sectores económicos (primarios y terciarios), la manufactura avanzada conlleva tanto la demanda de materias primas y componentes intermediarios, como de servicios financieros, transportes, software y muchos otros servicios dentro de la economía nacional. En consecuencia, la manufactura avanzada debe aprovecharse con visión a futuro; es necesario un enfoque confluyente en el que las capacidades de innovación, investigación, diseño, la cadena de suministro y la productividad de los procesos brinden beneficios a largo plazo (SE, 2020).

1.2 Generalidades: maquinado (mecanizado)

El maquinado parte de un bloque sólido del que se elimina poco a poco el material excedente hasta alcanzar la forma y acabado deseados. Por ende, existen distintas técnicas para la remoción de material que se logran haciendo uso de diversas herramientas o máquinas. Hay múltiples herramientas de corte para material que son utilizadas por los dispositivos de corte. Las distintas técnicas involucradas pueden listarse de la siguiente manera (Kumar & et al, 2018):

- Remoción de material utilizando un cortador de metal de un solo punto (buril).
- Sustracción de material usando cortadores de metal multi punto (cortadores verticales)
- Abrasivos como herramienta de corte.
- Maquinado ultrasónico.
- Maquinado electroquímico.
- Maquinado por electrodescarga.
- Maquinado por rayo láser.
- Maquinado mediante plasma.

Las distintas herramientas se utilizan acorde con el material que se desee maquinar. La eficiencia de los diversos instrumentos de corte se ha incrementado considerablemente mediante

el uso de sistemas de control numérico. Sin embargo, para el funcionamiento de algunos procesos de corte se requiere de ambientes controlados.

El maquinado haciendo uso de sistemas de control numérico y las herramientas utilizadas para tal fin con diversos sistemas de control, no difieren de los procesos tradicionales ya que en ambos casos se hace uso de la misma técnica de remoción de material. Esto se debe a que el control numérico es solo una técnica que se encarga de verificar la operación que se mejora mediante la retroalimentación de información relacionada con el proceso de corte, mediante una unidad de control que maneja los movimientos relativos entre la herramienta y la pieza de trabajo. El sistema de control numérico también controla otras características de la máquina como la selección de la herramienta de corte, giros, encendido y apagado de flujos de refrigerante, velocidad de giro de la herramienta, entre otras (Kumar & et al, 2018).

Lo que en suma se traduce en productos con una mayor calidad y con mejores características de precisión y exactitud. Además, es relevante porque el maquinado puede utilizarse como un proceso de conformación secundario. Otro rol clave del proceso es que se utiliza para realizar moldes y matrices complejos que a su vez son utilizados en otros procesos. De este modo, como principio de fabricación el maquinado es extremadamente flexible.

La libertad de forma es prácticamente ilimitada y la mayoría de los materiales pueden ser mecanizados: metales, plásticos y madera, e incluso vidrio y cerámica. De igual forma, el maquinado puede producir prototipos únicos o series pequeñas (haciendo uso de equipos universales), pero también puede producir grandes-medianos volúmenes (a través de máquinas automatizadas). Los procesos de mecanizado se pueden clasificar en mecánicos, como: taladrado, torneado, fresado, rectificado, y pulido, entre otros; térmicos: plasma y láser, así como, corte por agua. La gama de métodos de eliminación de material es amplia, y cada uno ofrece ciertas características geométricas, de precisión y acabado (Tempelman & et al, 2014).

Conceptos básicos del proceso

Inicialmente se trabaja con una aproximación que describe el proceso de corte, donde una herramienta de corte remueve material de una superficie sobre una pieza de trabajo. Generalmente, la herramienta se mueve perpendicularmente respecto de su eje, por lo que el corte se da en la periferia de la herramienta. La operación de mecanizado se realiza mediante el arranque de viruta a través del contacto entre los filos (dientes o gavilanes) y la pieza a manufacturar con cada pasada.

En el proceso tradicional (Fig. 6) se muestran las características del proceso de mecanizado ideal; esta vista inicial transversal simplificada es bidimensional y sin movimiento fuera del plano. La pieza se desplaza aproximando las regiones a mecanizar a la herramienta de corte, permitiendo así la obtención de diversas geometrías que van desde superficies planas hasta superficies complejas. El borde de ataque de una herramienta de corte se mueve con velocidad constante a través del material, a una profundidad definida por debajo de la superficie del objeto (t).

El borde de corte es filoso y triangular, con un ángulo de contorno (β) y posición relativa respecto del material definida a través de un ángulo de ataque (γ) y un ángulo de alivio (α). La suma de estos tres ángulos es exactamente de 90° y por lo tanto pueden seleccionarse libremente el ángulo β , que puede ser mayor a 90° en cuyo caso γ se vuelve negativo. La capa superior del material con la profundidad de corte (t) se retira y se curva hacia arriba para formar la viruta o rebaba de mecanizado.

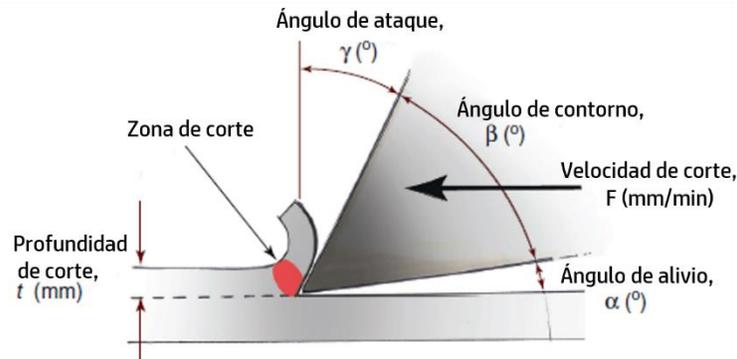


Figura 6. Proceso de maquinado ideal (Tempelman & et al, 2014).

En la práctica las caras inclinadas, los bordes y curvas de la herramienta conducen a un patrón de deformación tridimensional. De igual forma se considera que la herramienta de corte es lo suficientemente afilada y no sufre deformaciones ni se rompe. El mecanizado es un proceso de deformación plástica localizada en la zona adyacente al borde de corte (filo de la herramienta), de modo que, cuando se alcanza la resistencia máxima del material se consigue el desprendimiento de una rebaba o viruta, generando así, una nueva superficie (Ortiz Prado & et al, 2013).

El mecanismo plástico de cedencia en la región de corte (por movimiento de dislocación) es exactamente el mismo que tiene lugar en una prueba de tracción estándar, aunque a una tasa de deformación mucho mayor y el material se calienta rápidamente a medida que se remueve (Tempelman & et al, 2014). Entonces, podemos esperar que cuanto mayor sea el límite de cedencia del material, mayor será la fuerza requerida para eliminar capas de su superficie. Ya que por efecto de la deformación se presenta un endurecimiento tanto en el material desprendido como en la zona superficial y subsuperficial generadas por efecto de la operación (Ortiz Prado & et al, 2013).

Relaciones de fuerza y la ecuación de Merchant

Se pueden puntualizar varias fuerzas respecto al modelo de corte ortogonal. Con base en estas fuerzas, es posible definir el esfuerzo cortante, el coeficiente de fricción y algunas otras relaciones. *Eugene Merchant* dedujo una importante relación en el corte de metal. La deducción está basada

en la suposición de corte ortogonal, pero su validez en general se extiende a operaciones de maquinado en tres dimensiones.

Merchant empezó con la definición de esfuerzo cortante, expresado mediante la siguiente relación (Groover, 2014):

$$\tau = \frac{F_c \cos \varphi - F_t \sin \varphi}{(t_0 w / \sin \varphi)} \dots (1)$$

Donde fuerza de corte (F_c); fuerza de empuje (F_t); espesor de la viruta antes del corte (t_0); ancho de la operación de corte ortogonal (w) y ángulo del plano de corte (φ). Merchant pensó que entre los ángulos posibles que derivan del borde cortante de la herramienta donde puede ocurrir la deformación de corte, existe un ángulo predominante φ . Es en este ángulo donde el esfuerzo cortante es justamente igual a la resistencia al corte que presenta el material de trabajo, y por esta causa la deformación cortante se da a este ángulo. El ángulo del plano que minimiza la cantidad de energía durante la operación de corte puede calcularse al realizar la derivada del esfuerzo cortante τ en la ecuación (1) con respecto a φ , e igualando la derivada a cero. Despejando φ se obtiene la relación llamada ecuación de Merchant:

$$\varphi = 45 + \frac{\alpha}{2} + \frac{\beta}{2} \dots (2)$$

Una de las suposiciones en que se centra la ecuación de Merchant es que la resistencia al corte de la materia prima es una constante a la que no le afectan parámetros como la velocidad de deformación, la temperatura, entre otros factores. Sin embargo, estas suposiciones no corresponden a las operaciones prácticas de maquinado, por ello la ecuación (2) debe ser considerada como una aproximación matemática poco precisa pero útil para el entendimiento del proceso.

De esta manera, el valor real de la ecuación de Merchant radica en que se define de manera general el ángulo de ataque, la fricción herramienta-viruta y el ángulo del plano de corte. Brindando información clara que permite incrementar el ángulo de corte: 1) aumentando el ángulo de ataque y 2) disminuir el ángulo de fricción (o coeficiente de fricción) entre la herramienta y la viruta. El ángulo de ataque puede ser incrementado al diseñar la herramienta adecuadamente y el ángulo de fricción puede reducirse al hacer uso de un fluido lubricante para el corte.

La importancia de modificar el ángulo del plano de corte se aprecia en mejor medida en la figura 7. Considerando la mayoría de los factores constantes, a mayor ángulo del plano de corte se tiene menor área de corte $A_s = (t_0 w) / (\sin \varphi)$. La oposición al corte se aplica a través de esta área, de modo que, la fuerza que se requiere para formar la viruta es menor cuando el área del plano de corte decrece. Un ángulo más alto del plano de corte da como resultado energías y temperaturas de corte más bajas. Por ello, son buenas razones para considerar ángulos pronunciados para el plano de corte durante las operaciones de maquinado (Groover, 2014).

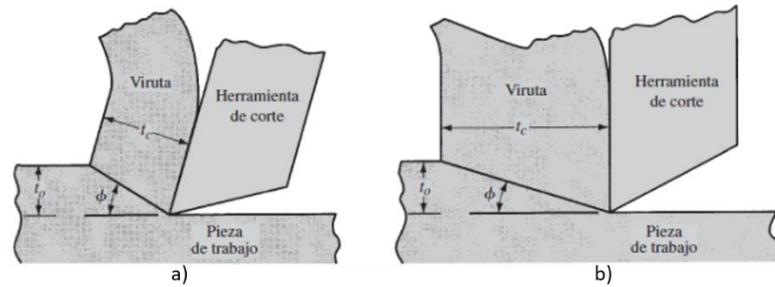


Figura 7. Efecto del ángulo del plano de corte ϕ . a) a mayor ϕ , resulta una menor área del plano de corte; b) a menor ϕ , corresponde una mayor área del plano de corte. El ángulo de ataque es mayor en a), lo cual tiende a incrementar el ángulo cortante de acuerdo con la ecuación de Merchant (Groover, 2014).

La figura 8 analiza más a detalle el proceso de maquinado. Primeramente, se observa como la herramienta de corte no solo requiere ser encauzada en la dirección horizontal con respecto de la pieza de trabajo (componente de fuerza tangencial F_h), sino que también debe ser empujada hacia abajo (componente de fuerza normal F_v). La componente normal ayuda a que la herramienta se retire del material y cuanto más pequeño es el ángulo de ataque (γ) mayor debe ser esta componente.

Además, se aprecia cómo justo debajo de la herramienta se genera una deformación elástica en oposición a la fuerza normal y la cual se reestablece cuando se pierde el efecto de la misma. Es por ello que se requiere del ángulo de alivio (α); pues sin él, la fricción entre la herramienta y el material sería aún mayor. La teoría de plasticidad indica que, para ángulos de ataque típicos, la fuerza tangencial debe ser $F_h \approx 1.5kt$ (por unidad del ancho de corte) donde k es el límite elástico (típicamente 50%-60% del límite de cedencia) y t es la profundidad de corte. Generalmente, se supone que $F_h \approx 3F_v$. La fuerza resultante del proceso se señala en la figura como $F_{maquinado} = \sqrt{F_h^2 + F_v^2}$.

De manera práctica, el ángulo de alivio (α) es de alrededor de 4 grados para el acero, 6 grados para el aluminio y 10 grados para la mayoría de los plásticos. De igual forma el ángulo de contorno (β) varía según el material (Tempelman & et al, 2014).

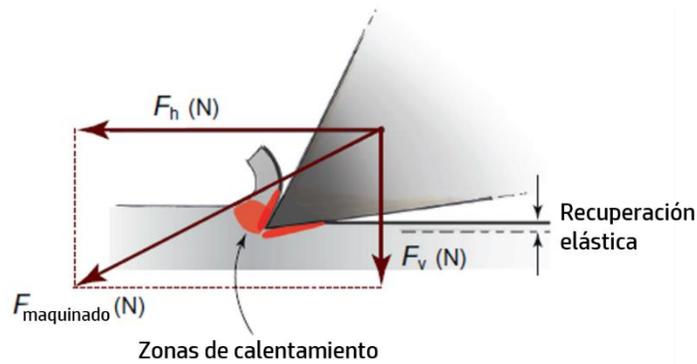


Figura 8. Fuerzas, recuperación elástica y calor generado en el proceso de maquinado (Tempelman & et al, 2014).

Las características implícitas y explícitas del proceso de manufactura propician que al mecanizar materiales dúctiles se formen rebabas largas y continuas que se enrollan en espirales; con materiales más frágiles, se obtengan virutas cortas. De manera que, los límites de deformación de los materiales son importantes dentro de las operaciones de maquinado.

Tipos de viruta

Cuando se asegura la formación de viruta, puede ocurrir de diferentes maneras. De acuerdo al fenómeno de generación puede clasificarse como: continua, laminar, segmentada o discontinua. La formación de viruta continua se caracteriza por generar estructuras de material uniformemente deformadas, cuya causa generación se da al tener condiciones temporales de fricción entre el material y la herramienta de forma prolongada.

La formación de viruta laminar se caracteriza por una estructura de material con deformaciones desiguales. La causa de ello se explica debido a condiciones alteradas de fricción entre la herramienta y el material, al deslizamiento de los elementos o a la transferencia de tensión dinámica entre los componentes. Las frecuencias de las vibraciones causadas por movimientos antideslizantes (cuando la fricción estática de un cuerpo es significativamente mayor que la fricción deslizante) generan amplitudes de onda en kilo Hertz que conciben *bandas de corte*.

Las bandas de corte aparecen al mecanizar materiales de alta resistencia con altos niveles de deformabilidad y en consecuencia generan virutas segmentadas, sobre todo, cuando se tienen mecanizados con altas velocidades de corte. Y se deben principalmente a que las condiciones de esfuerzo en la zona de corte exceden la deformabilidad del material (resistencia al corte) por lo que se presenta un desprendimiento de las áreas del material que posteriormente vuelven a fusionarse. Además de las vibraciones, el sistema entero consiste en la máquina herramienta, la herramienta, la pieza de trabajo y los accesorios que se encuentran influenciados por otros efectos dinámicos como el efecto regenerativo (chatter) o el acoplamiento direccional (pérdidas de potencia) (Fritz, 2011).

Por último, se tiene el concepto de viruta discontinua. Este proceso se distingue de los demás por el hecho de que no se produce deformación plástica alguna previo a la fractura del material. Por ello, se observan astillas discontinuas al momento de mecanizar los materiales con propiedades frágiles como el hierro fundido, aluminio o plástico. En resumen (Fig. 9):

- La *viruta continua* se produce cuando el material posee suficiente deformabilidad ($\varepsilon_B > \varepsilon_0$); la microestructura es uniforme en el área de corte, la deformación no genera fragilidad y la formación de virutas no se ve afectada por las vibraciones.
- La *viruta laminar* se forma cuando $\varepsilon_B < \varepsilon_0 < \varepsilon_F$ y la microestructura no es uniforme o el efecto de las vibraciones incrementa el espesor de la viruta. Pueden formarse a altas velocidades de alimentación y de corte.
- Las *virutas segmentadas* consisten en partes del material que se desprenden durante el corte y que se fusionan nuevamente. Se forman cuando $\varepsilon_F < \varepsilon_0$. Las virutas segmentadas también pueden formarse a velocidades extremadamente reducidas ($F = 1000 - 3000 \text{ mm/min}$).
- La viruta discontinua se forma al cortar materiales frágiles con microestructuras desiguales (anisotrópicos). De manera que, las virutas no se desprenden, pero se arrancan de la superficie generando daños debido a las roturas generadas sobre la superficie de trabajo.

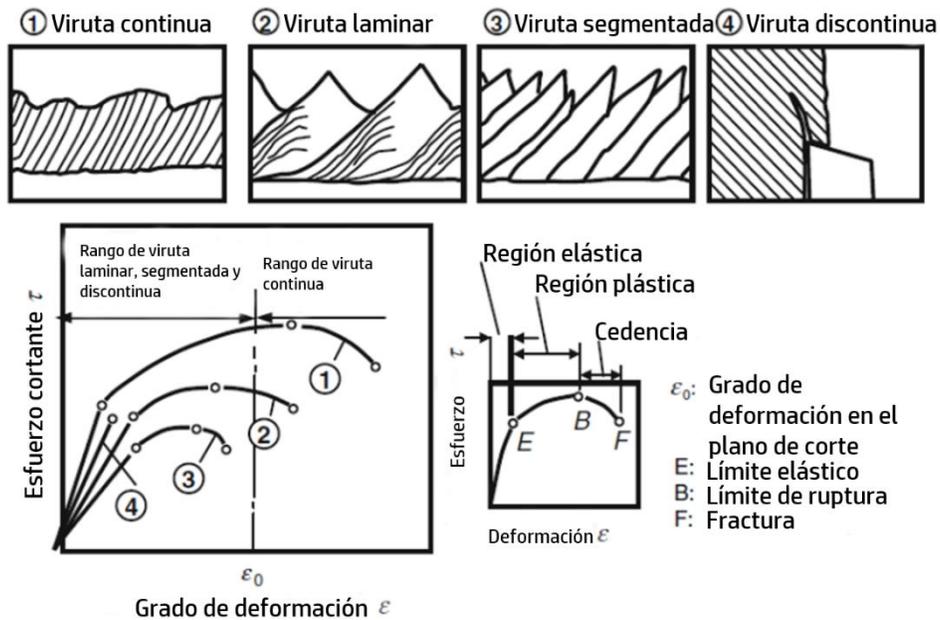


Figura 9. Tipos de viruta de acuerdo al material (Fritz, 2011).

La figura 10, muestra una visión general orientada al sistema de esferas de influencia dinámicas en la generación de viruta. Este sistema está fuertemente influenciado por la velocidad de corte, el material a mecanizar, la geometría de las herramientas y la cinemática del proceso.

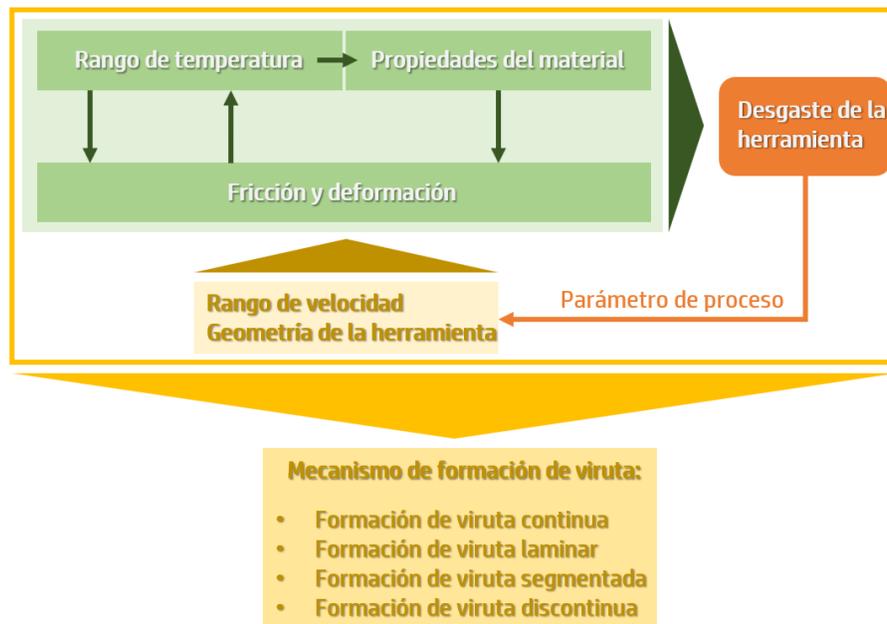


Figura 10. Influencia en la formación de viruta (Fritz, 2011).

1.3 Fresado

El proceso de fresado es una operación de corte intermitente que hace uso de una herramienta de corte con una o más aristas afiladas y ubicadas simétricamente con respecto al eje de rotación. La fresa de corte normalmente se sujeta a un husillo rotatorio, mientras que la pieza a maquinar se sujeta a una mesa de trabajo. Este proceso puede ser realizado en varios ejes de movimiento gracias a la inclusión del control numérico.

Dada la variedad de configuraciones y características geométricas que el proceso puede generar, el fresado es una de las operaciones de maquinado más versátiles ampliamente utilizadas en el sector industrial. De acuerdo con la orientación de la herramienta con respecto de la pieza a maquinar las fresadoras pueden clasificarse como se muestra en la tabla 1 (Ramírez Jerónimo, 2017).

Tabla 1. Clasificación de las fresadoras (Ramírez Jerónimo, 2017).

Máquina	Características	Limitaciones
Fresadora Horizontal	El cortador se coloca en un eje horizontal. La mesa de trabajo es fija y sobre ésta se desliza un carro con dos movimientos automáticos: transversal y longitudinal. Se utiliza generalmente en el ranurado de diversas formas.	La profundidad de trabajo se restringe por la diferencia entre el radio exterior del portaherramientas y el radio exterior del cortador.
Fresadora Vertical	El cortador se coloca en un husillo vertical, perpendicular a la mesa, al girar produce el movimiento principal. La mesa y el husillo realizan un desplazamiento vertical, lo que facilita la remoción de la viruta.	La fuerza generada por el contacto entre el cortador y la mesa de trabajo limita la velocidad de avance.
Fresadora Universal	El cortador se coloca sobre un eje horizontal mientras que la mesa tiene un desplazamiento vertical. Este tipo de fresadoras posee un movimiento que le permite el giro horizontal. Sus características la hacen ideal en el corte de formas helicoidales tales como brocas, algunos engranajes, fresas, etc.	Las guías de este tipo de fresadora son de dimensión reducida, con lo cual se limita el tamaño de las piezas a maquinar.
Fresado CNC	Combina las operaciones de las fresadoras mencionadas anteriormente. El proceso es totalmente automático. Mejora la precisión de las piezas maquinadas.	Se requiere de volúmenes altos para mantener la eficiencia del proceso. Es necesario programar en forma correcta la selección de las herramientas de corte y la secuencia de operación para un funcionamiento eficiente.

La norma DIN-8589 clasifica las operaciones de fresado de acuerdo con las superficies producidas según el movimiento de la herramienta. En el fresado frontal, el eje de rotación de la herramienta es ortogonal a la superficie de trabajo, mientras que, en el fresado periférico, el eje es paralelo a la superficie. El fresado lateral es una combinación de los dos procesos anteriores y es usado para producir dos superficies ortogonales entre ellas. En el fresado de perfiles, la forma y las dimensiones de la herramienta son reproducidas en la pieza. El fresado de formas puede producir la mayor variedad de superficies, que dependen del número de ejes controlables en la fresadora (Fig. 11).

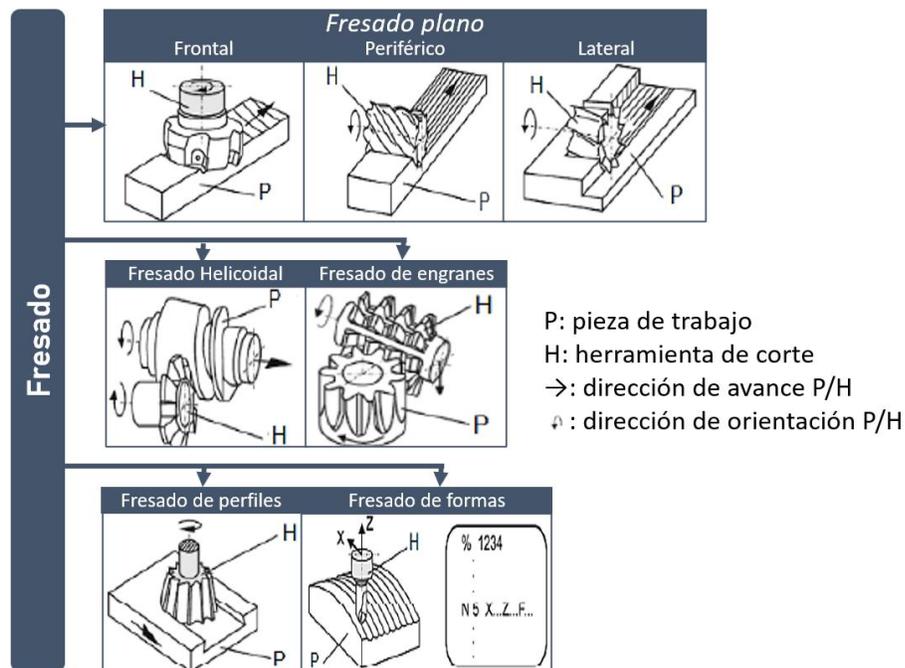


Figura 11. Tipos de fresado (Ramírez Jerónimo, 2017).

Parámetros del proceso

El proceso de arranque de viruta se lleva a cabo por la penetración de una herramienta de corte, donde el material de esta es de mayor dureza que la materia prima que se pretende maquinar. Esto se produce a través del movimiento relativo entre la pieza de trabajo y la herramienta de corte. De este modo pueden identificarse los siguientes parámetros básicos (Groover, 2014):

- **Corte:** garantiza que la herramienta se introduzca en el material generando viruta y puede ser identificado a través de la velocidad de corte.
- **Avance:** es el trayecto del punto de aplicación de corte que sitúa a la herramienta en una nueva capa o sección sin mecanizar y que puede identificarse mediante la velocidad de avance.

- *Profundidad de corte (penetración o alimentación)*: permite cortar un espesor determinado de la materia prima situando a la herramienta de trabajo en una nueva área de mecanizado y se detalla mediante el parámetro de profundidad de corte.

La relación entre cada uno de los parámetros se aplica tanto a la pieza de trabajo como a la herramienta de corte utilizada para la operación. La acción predominante del corte involucra la deformación cortante del material de trabajo para formar la viruta; al removerse la viruta, queda expuesta una nueva superficie.

1.4 Perturbaciones del proceso de manufactura

Diversos factores afectan la generación de las superficies a manufacturar, como pueden ser: la geometría de la herramienta, los parámetros de mecanizado y la estabilidad del mecanizado; especialmente en el micro maquinado el proceso de generación de superficie es muy complicado. Cualquier cambio en los parámetros del proceso puede resultar en un cambio significativo en las microestructuras deseadas. Por ende, para obtener acabados de superficie con un rendimiento adecuado es importante estudiar la influencia de los parámetros como profundidad de corte, velocidad de avance, velocidad de giro de la herramienta, periodo de influencia de perturbaciones y consumo de energía (Nieslony, Krolczyk, & et al, 2018).

La tarea básica de la manufactura es proveer piezas de trabajo con características de calidad específicas en cuanto a su cantidad y con la mejor relación costo-beneficio posible. Cada proceso de manufactura se ve afectado por distintas perturbaciones, que pueden ser externas o internas (ocurriendo dentro del proceso en sí). Por esta razón, las propiedades funcionalmente determinantes de los componentes se proveen con tolerancias.

Si durante el proceso el departamento de calidad encuentra valores que se encuentran fuera de la tolerancia indicada, se dice que la pieza es defectuosa. Por lo tanto, las características de funcionalidad de los objetos deben ser validadas ya sea durante o al final de la fabricación. Factores importantes de perturbación que deben tenerse en cuenta como posibles causas de defectos son: perturbaciones causadas por fuerzas estáticas, como las desviaciones efectuadas por el peso de la pieza de trabajo o errores de sujeción; perturbaciones causadas por fuerzas dinámicas a través del cabeceo de la herramienta u oscilaciones forzadas debidas a errores de montaje de los portaherramientas o a la excentricidad del husillo en la máquina; alteraciones causadas por influencias térmicas, tales como calor de proceso o fuentes internas de calor en la máquina herramienta; y modificaciones causadas por el desgaste de la herramienta (Fig. 12).

De igual manera, deben validarse las perturbaciones resultantes de la cinemática de acoplamiento entre la herramienta y la pieza de trabajo como las desviaciones de corte que se generan durante las operaciones de fresado; el efecto de difracción y textura de las superficies ocasionadas por marcas del herramental aplicado sistemáticamente. Las características de calidad determinantes pueden definirse mediante propiedades geométricas *macro*. Es decir, la precisión de las dimensiones, forma y posición de los elementos geométricos. Los parámetros geométricos

micro incluyen características de los valores de superficie, como la rugosidad, valores medios de la rugosidad y profundidad de los acabados (Fritz, 2011).

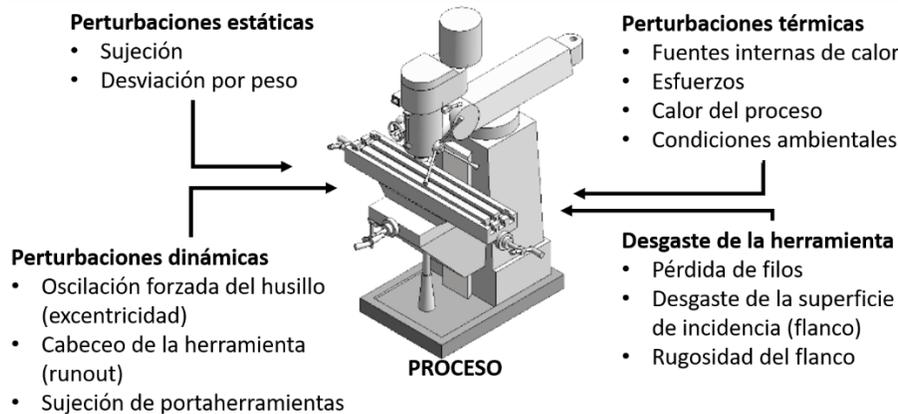


Figura 12. Variables de perturbación en el proceso de manufactura.

Sin embargo, la integridad funcional de los procesos requiere que ciertas variables del proceso como la rugosidad, geometría y tamaño cuenten con tolerancias amplias, aunque se encuentren por debajo de la superficie periférica. Estos pueden incluir valores de dureza, tensiones residuales u otras propiedades estructurales de las piezas de trabajo. Las fluctuaciones de las características en las piezas de trabajo ocurren en todos los procesos de manufactura y se derivan básicamente de la influencia de las perturbaciones sistemáticas o aleatorias.

Los errores sistemáticos son ocasionados por el sistema. Estos son reproducibles bajo condiciones de frontera idénticas y cambian las características en direcciones simples; ocasionando tendencias de manufactura. Si las causas de estos errores son conocidos, pueden corregirse y compensarse. Ejemplos de errores sistemáticos son los errores geométricos de los elementos guía de la maquinaria (ejes) y las compensaciones debidas al desgaste continuo de los cortadores durante el proceso; los cambios en la fuerza de corte ocasionados por fluctuaciones repentinas de la profundidad de corte y las desviaciones asociadas a ello, también pueden ser de naturaleza sistémica (Fritz, 2011).

Aleatoriamente también ocurren perturbaciones que encabezan los cambios en las características de las piezas y no pueden predecirse en un modo estrictamente determinístico. La influencia de estos efectos resulta en dos direcciones una positiva y otra negativa. De este modo, el resultado del trabajo obtenido resulta inestable.

Sin embargo, la influencia de las perturbaciones aleatorias en el resultado del trabajo puede registrarse de forma estadística. Las fluctuaciones en la estructura de los materiales, temperaturas u oscilaciones repentinas dentro de un proceso pueden ser recabadas de esta forma. Cabe señalar que dentro de los procesos reales no siempre es fácil distinguir entre las influencias sistemáticas y aleatorias.

Ya que, las condiciones críticas de proceso se dan cuando la cantidad de calor generado entre la herramienta y la pieza de trabajo provocan tensiones sobre las superficies de las partes a manufacturar induciendo así variaciones de las características geométricas. Así pues, esto revela la importancia de contar con procedimientos de medición o análisis que garanticen la calidad de las piezas fabricadas. De manera general se requieren de múltiples operaciones para la fabricación de un objeto (Fritz, 2011).

El progreso de fabricación resulta de una secuencia de etapas dentro del proceso; con cada paso dentro curso de producción, los cambios característicos como geometría, superficies, etc. Desarrollan un historial de manufactura. De este modo, las propiedades de salida de una pieza se convierten en factores de entrada para la secuencia siguiente dentro del proceso; generándose así, una interacción significativa entre el paso actual y los cambios realizados con anterioridad. Asimismo, la repetibilidad y constancia de la posición y el movimiento de la pieza de trabajo relativa a la herramienta es uno de los factores determinantes para la similitud del tamaño de los componentes producidos y por ende para la estabilidad del proceso.

La profundidad mínima de corte obtenida establece la exactitud y precisión con el cual los componentes están hechos. Además, una relación inversa ha sido observada entre la precisión del componente y el tiempo requerido para el posicionamiento manual de la herramienta de trabajo. De modo que, se requiere de mayor tiempo para el posicionamiento manual y con ello obtener componentes más precisos. Por ende, los mecanismos de control numérico poseen una mayor influencia para mantener una relación consistente entre la pieza y la herramienta de trabajo (Kumar & et al, 2018).

Por principio, cada producto manufacturado posee mediciones sujetas a cierta magnitud de error. Algunas de las causas probables de estos errores se muestran en el diagrama de Ishikawa mostrado en la figura 13. Las causas de los errores de medición pueden deberse al procedimiento de medida como: el instrumento de medida, el objeto que se mide o la persona que realiza la medición, la preparación de los equipos y el entorno en que se realizan las mediciones.

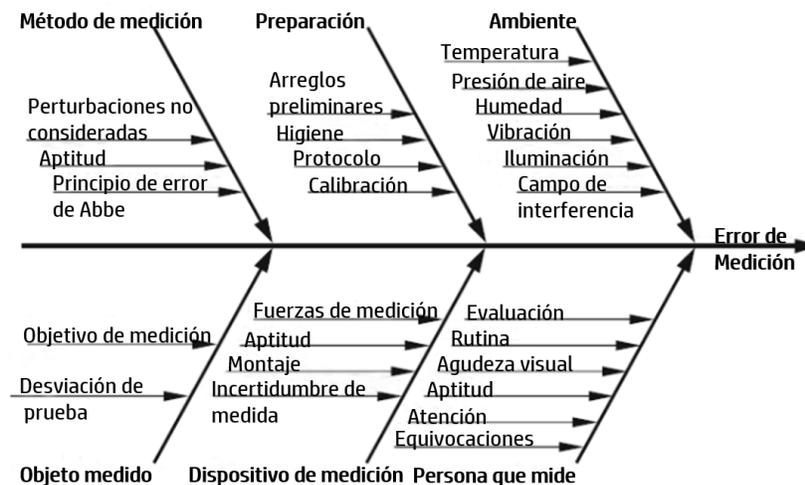


Figura 13. Causas de los errores de medición según el procedimiento de medida (Fritz, 2011).

Para lograr una precisión adecuada, es necesario tener en cuenta las influencias mencionadas anteriormente y cuando sea necesario, minimizarlas, compensarlas o al menos tener una estimación de las mismas en términos de magnitud con el fin de garantizar las características de calidad, funcionalidad y costo solicitadas. El proceso de fresado solo es estable para ciertas combinaciones de velocidad y profundidad de corte. Cuando se exceden los rangos de estabilidad se producen fuertes vibraciones que afectan la apariencia de las piezas fabricadas. De ahí que, el punto característico en que se presenta este fenómeno debe ser conocido; de lo contrario, el proceso puede caer en rangos de desempeño menores a lo esperado.

Capítulo 2: Conceptos básicos

«Puede decirse que la diferencia más sobresaliente entre los hombres de ciencia y los demás profesionales es que los primeros aceptan su ignorancia y parten de ella para realizar sus trabajos y observaciones, mientras que los segundos basan sus actividades en los conocimientos que ya poseen o creen poseer».

– Dr. Ruy Pérez Tamayo –

2.1 Conceptos de vibración

Cualquier movimiento que se repita constantemente después de un intervalo de tiempo dado es llamado vibración u oscilación. El balanceo de un péndulo (Fig. 14) y el movimiento de una cuerda pulsada son ejemplos típicos de vibración; donde, masa (m), desplazamiento angular (θ), constante de gravitación (g), longitud al origen (l) y desplazamiento lineal (x). La teoría de vibración se ocupa del estudio de los movimientos oscilatorios de los cuerpos y las fuerzas asociadas a ellos (Rao, 2017).

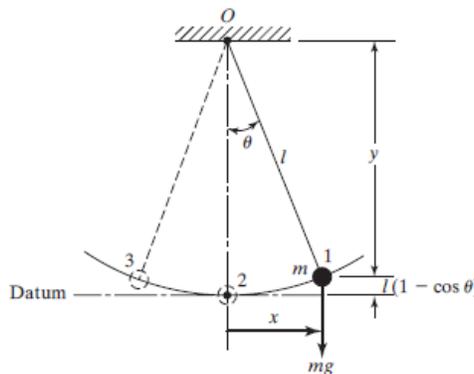


Figura 14. Péndulo simple (Rao, 2017).

Un sistema vibratorio en general incluye un medio de almacenamiento de la energía potencial (resorte o elasticidad), un entorno para el almacenamiento de la energía cinética (masa o inercia) y un modo por el cual la energía se disipa gradualmente (amortiguador). La vibración de un sistema supone la transferencia de energía potencial a energía cinética o energía cinética a potencial de manera alternada. Si el sistema es amortiguado, algo de la energía es disipada durante cada ciclo de vibración y se debe reemplazar por una fuente externa si se desea mantener un estado de vibración constante.

Considerando el péndulo simple de la figura 14 donde una vez que este parte del punto de equilibrio y con la ganancia de energía brindada por el desplazamiento angular (θ) y la energía potencial $mgl(1 - \cos \theta)$ comienza a oscilar y a pasar por el punto de equilibrio en repetidas ocasiones generando un movimiento oscilatorio. Sin embargo, en la práctica, la magnitud de la oscilación (θ) disminuye gradualmente y el péndulo se detiene debido a la resistencia (amortiguamiento) proporcionado por el medio que le rodea (aire). Esto significa que algo de la energía se disipa en cada ciclo de vibración mientras se amortigua por el aire.

El número mínimo de coordenadas independientes requeridas para determinar por completo la posición de todas las partes de un sistema en cualquier instante de tiempo define el número de grados de libertad del sistema. El péndulo mostrado representa un sistema simple de un grado de libertad. Los sistemas con un número finito de grados de libertad son llamados discretos o sistemas de parámetros concentrados y aquellos con un número infinito de grados de libertad son llamados continuos o sistemas distribuidos.

Los sistemas continuos representan de mejor manera el comportamiento real de los sistemas, pero sus métodos de análisis son complejos en comparación a los utilizados para los sistemas discretos. Los métodos analíticos disponibles para tratar los sistemas continuos se centran en problemas definidos de manera concreta, como vigas uniformes, barras delgadas y placas delgadas. Por lo tanto, la mayoría de los sistemas prácticos se estudian tratándolos como masas concentradas finitas, resortes y amortiguadores. En general, se obtienen resultados con menores errores al aumentar el número de masas, resortes y amortiguadores, es decir, al incrementar el número de grados de libertad.

Clasificación de la vibración

Las vibraciones pueden clasificarse de diversas maneras. Algunas de las clasificaciones más importantes son las siguientes (Rao, 2017):

- *Vibración libre:* si un sistema, después de una perturbación inicial, se mantiene vibrando por sí solo, la vibración resultante se conoce como vibración libre. Ninguna fuerza externa actúa sobre el sistema. La oscilación de un péndulo simple es un ejemplo de vibración libre.
- *Vibración forzada:* si un sistema está sujeto a una fuerza externa (a menudo, un tipo de fuerza que se repite), la vibración resultante se conoce como vibración forzada. La oscilación que surge en máquinas como los motores diésel es un ejemplo de vibración forzada.

Si la frecuencia de la fuerza externa coincide con una de las frecuencias naturales del sistema, se produce una condición conocida como resonancia y el sistema experimenta oscilaciones peligrosamente grandes. Las fallas de estructuras tales como edificios, puentes, turbinas y alas de aviones se han asociado con la ocurrencia de resonancia.

- *Vibración amortiguada y no amortiguada:* si no se pierde o disipa energía alguna por fricción u otra resistencia durante la oscilación, la vibración se conoce como vibración no

amortiguada. Si la energía se pierde de esta manera, sin embargo, se llama vibración amortiguada. En muchos sistemas físicos, la cantidad de amortiguamiento es tan pequeña que puede ignorarse para la mayoría de los propósitos de ingeniería.

Sin embargo, la consideración de la amortiguación se vuelve extremadamente importante en el análisis de sistemas vibratorios cercanos a la resonancia.

- *Vibración lineal y no lineal:* si todos los componentes básicos de un sistema vibratorio (el resorte, la masa, y el amortiguador) se comportan de manera lineal, la vibración resultante se conoce como vibración lineal. Si, sin embargo, alguno de los componentes esenciales posee un comportamiento no lineal, la vibración se llama no lineal. Las ecuaciones diferenciales que modelan el comportamiento lineal y no lineal de los sistemas vibratorio son lineales y no lineales respectivamente.

Si la vibración es lineal, el principio de superposición se mantiene, y las técnicas matemáticas de análisis están bien desarrolladas. Para la vibración no lineal, el principio de superposición no es válido, y las técnicas de análisis son menos conocidas. Dado que todos los sistemas vibratorios tienden a comportarse de manera no lineal al aumentar la amplitud de la oscilación, es deseable un conocimiento de la vibración no lineal al tratar con los sistemas vibratorios prácticos.

- *Vibración determinística y aleatoria:* si el valor o la magnitud de la excitación (fuerza o movimiento) que actúa sobre un sistema vibratorio se conoce en un momento dado, la excitación se denomina determinista. La vibración resultante se conoce como vibración determinista. En algunos casos, la excitación es no determinista o aleatoria; el valor de la excitación en un momento dado no se puede predecir.

En estos casos, una gran colección de registros de la excitación puede mostrar cierta regularidad estadística. Es posible estimar promedios tales como la media y la media cuadrática de los valores de excitación. Valores de excitaciones aleatorias se encuentran presentes en la velocidad del viento, la rugosidad de la carretera y el movimiento del suelo durante los terremotos.

Si la excitación es aleatoria, la vibración resultante se llama vibración aleatoria. En este caso, la respuesta vibratoria del sistema también es aleatoria; sólo puede describirse en términos de cantidades estadísticas.

2.2 Vibraciones mecánicas

La vibración mecánica puede definirse como un movimiento oscilatorio que se genera en un cuerpo alrededor de una posición de equilibrio. También puede precisarse como un movimiento que se da de manera repetitiva y que permite a un cuerpo (o partícula) recuperar su posición inicial, si dicho movimiento conserva las características propias del cuerpo, así como, valores de magnitud

razonablemente semejantes durante un periodo de tiempo dado, se dice que dicha vibración es periódica (Ramírez Jerónimo, 2017).

La vibración de un objeto implica la transformación de su energía potencial en energía cinética y viceversa, de forma periódica. Si el sistema pierde energía durante cada ciclo de vibración es necesario incorporar una fuente de energía externa para que mantenga un estado de vibración. Un sistema vibratorio se define como todo aquel que posee un movimiento con características de oscilación. De igual forma, en el estudio de cualquier sistema con condiciones de oscilación deben definirse el mínimo y suficiente número de coordenadas independientes que se requieren para la definición del estado del sistema en cualquier instante de tiempo (grado de libertad).

De este modo, las coordenadas necesarias para describir el movimiento de un sistema se definen como coordenadas generalizadas. Dichas coordenadas suelen indicarse como q_1, q_2, \dots, q_n y representan los grados de libertad del sistema. Las coordenadas generalizadas pueden representar coordenadas cartesianas, polares o de otro tipo. Mediante una cantidad finita de grados de libertad pueden describirse sistemas más prácticos como los que se muestran en la figura 15 (Rao, 2017).

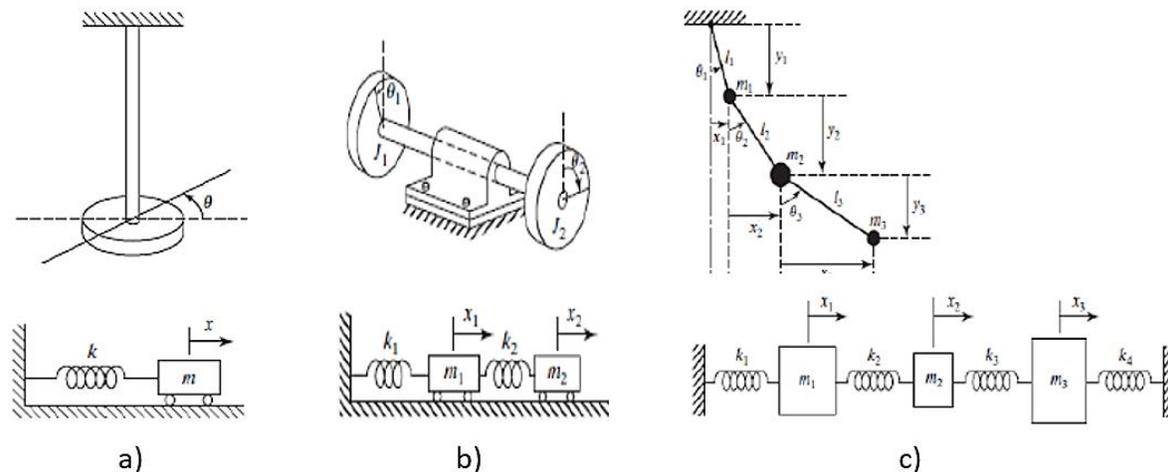


Figura 15. Sistemas con diversos grados de libertad (GDL): a) 1 GDL; b) 2 GDL y c) 3 GDL (Rao, 2017).

Los sistemas vibratorios discretos poseen un número finito de grados de libertad y generalmente representan aproximaciones de sistemas vibratorios continuos, los cuales tienen un número infinito de coordenadas independientes. Los cuerpos que poseen masa y elasticidad distribuida continuamente, se encuentran dentro de los sistemas con estas características; para especificar el lugar de cada una de las partículas en el cuerpo elástico se requiere de un número infinito de GDL. De manera opuesta los sistemas continuos muestran de forma más exacta el comportamiento real de los sistemas, pero, las metodologías empleadas para su análisis suelen ser más complejas en comparación con los empleados para el análisis de sistemas discretos (Balachandran & Magrab, 2009).

Componentes para la descripción y modelado de un sistema vibratorio

Los componentes que forman un sistema vibratorio comúnmente se componen de un medio que almacena energía potencial (resorte o elasticidad), un medio que permite la conservación de la energía cinética (masa o inercia) y un medio por el cual la energía se disipa de manera gradual (amortiguador). Dichos elementos se describen a detalle a continuación (Rao, 2017):

- **Componente de rigidez (resorte):** un resorte es un elemento con características de elasticidad capaz de acumular energía sin sufrir deformaciones permanentes; para el análisis de dichos elementos generalmente se desprecian su masa y factor de amortiguamiento. De este modo, cualquier elemento o cuerpo deformable como: cables, barras, vigas, flechas o placas; pueden considerarse como resortes y suelen representarse como se muestra en la figura 16.

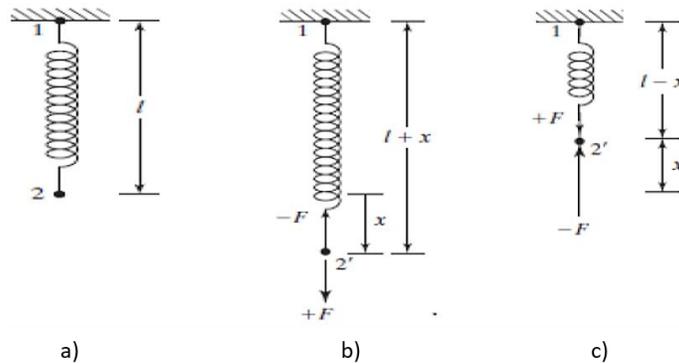


Figura 16. Representaciones diversas del resorte: a) equilibrio; b) elongación y c) compresión (Rao, 2017).

Un resorte es lineal si el desplazamiento de longitud x se relaciona con la fuerza aplicada mediante la ecuación $F(x) = kx$; donde $F(x)$ es la fuerza de restablecimiento del resorte y k es una constante, conocida como la constante de resorte o rigidez de resorte. Dicha constante, siempre es positiva e indica la fuerza (positiva o negativa) que se requiere para producir un alargamiento o una compresión en el resorte. El trabajo realizado al deformar un resorte se almacena como energía potencial E_{pk} y se encuentra dado por $E_{pk} = \frac{1}{2}kx^2$.

- **Componente de inercia (masa):** los componentes de inercia o la masa pueden ganar o perder energía cinética mientras varía su velocidad. Según la ley fundamental de la dinámica de Newton, el producto de la masa y su aceleración son iguales a la fuerza que se aplica a la masa $F(\ddot{x}) = m\ddot{x}$. Donde $F(\ddot{x})$ es la fuerza debida a la aceleración que experimenta la masa; m es la masa y \ddot{x} es la segunda derivada del desplazamiento con respecto del tiempo (aceleración).

El trabajo realizado por una componente de inercia se determina mediante la fuerza que altera el estado de movimiento de un cuerpo. Dicho trabajo realizado es almacenado en forma de energía cinética: $E_{c_m} = \frac{1}{2}m\dot{x}^2$.

- *Componente de pérdidas graduales de energía (amortiguador):* dentro del modelado de sistemas físicos, la energía que se produce por efecto de las vibraciones se convierte de manera gradual en calor o en sonido. De esta forma, la energía se ve gradualmente disminuida y por ende la respuesta, como el desplazamiento del sistema también se ve reducido. El mecanismo a través del cual la energía de vibración es transformada de forma gradual en calor o sonido es conocido como amortiguamiento.

Pese a que la cantidad de energía que se disipa a través del calor o el sonido es pequeña, su consideración al modelar un sistema es de importancia, pues permite predecir con mayor exactitud la respuesta de vibración dentro de un sistema. Para lograr esto, se realiza la suposición de un amortiguador que no posee masa ni elasticidad, y que la capacidad de amortiguamiento se da sólo si existen variaciones relativas de velocidad con respecto a los extremos del amortiguador.

De esta manera, la expresión que relaciona la fuerza con la velocidad se expresa como $F(\dot{x}) = c\dot{x}$; donde $F(\dot{x})$ es la fuerza debida al amortiguamiento; c representa la disipación de energía del amortiguador (constante positiva de amortiguamiento) y \dot{x} es la derivada del desplazamiento con respecto al tiempo (velocidad). La energía que se disipa a través de un amortiguador se expresa mediante $E_{d_c} = \frac{1}{2}c\dot{x}^2$.

Y de igual manera, pueden identificarse parámetros que definen un fenómeno de vibración, como la frecuencia natural no amortiguada, el factor de amortiguamiento relativo y el periodo de vibración. A continuación, se definen las características de dichos parámetros:

- (1) Frecuencia natural no amortiguada (ω_n): se trata de la frecuencia de oscilación de un sistema en radianes por segundo y se expresa mediante la ecuación $\omega_n = 2\pi f_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$ en donde f_n es la frecuencia natural expresada en Hertz (Hz); k es la constante del resorte y m es la masa.
- (2) Factor de amortiguamiento relativo (ζ): se considera como la interpretación de la respuesta de un sistema ante la presencia de una perturbación $\zeta = \frac{c}{2m\omega_n} = \frac{c}{2\sqrt{km}} = \frac{c\omega_n}{2k}$ cuando $\zeta = 1$, el sistema es críticamente amortiguado; cuando $0 < \zeta < 1$, el sistema es subamortiguado y cuando $\zeta > 1$, el sistema es sobreamortiguado.
- (3) Periodo de vibración (T): es el tiempo que transcurre entre dos puntos equivalentes de oscilación $T = \frac{1}{f_n} = \frac{2\pi}{\omega_n}$.

Característica del modelado matemático de vibraciones

El modelo matemático de fenómenos reales, utiliza consideraciones como: masas puntuales o cargas concentradas para determinar las características físicas de los objetos. Dichas entidades no son idealizaciones por lo que son llamadas modelos de *parámetros concentrados* y se caracterizan mediante el uso de ecuaciones diferenciales ordinarias. Los modelos matemáticos que consideran el estado real de los elementos que componen un sistema como: resistencia eléctrica, capacitancia, cargas, esfuerzos o resortes con masas; se denominan modelos de *parámetros distribuidos* y son representados mediante el uso de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales.

Los modelos para la representación de los parámetros distribuidos son más complejos. Sin embargo, en la mayoría de los casos dichos modelos pueden considerarse como modelos concentrados con el fin de intentar dar solución a los sistemas de ecuaciones. La linealización de los sistemas posibilita el uso de diversos métodos de análisis y permiten determinar de manera sencilla el comportamiento de los sistemas (Caixu & et al, 2019).

2.3 Vibración en el proceso de fresado

Un problema frecuente durante el proceso de fresado son las vibraciones que pueden ocasionarse por sujeciones incorrectas o poco rígidas de la pieza o bien porque la pieza a mecanizar sufre deformaciones cuando la herramienta de fresado incide sobre la superficie de la misma. Este tipo de vibraciones afecta de manera directa las tolerancias dimensionales y los acabados superficiales de las piezas manufacturadas, así como, el consumo de energía. Por ello, para mejorar los acabados superficiales de dichas piezas es necesario garantizar la estabilidad del sistema (Quintana & Ciurana, 2011).

Durante las operaciones de fresado por control numérico pueden presentarse tres tipos de vibración: libre, forzada y auto excitada (chatter). Los dos primeros tipos de vibración ya han sido presentados en la sección 2.1 por lo que la vibración auto excitada se describe a continuación (Altintas, 2012):

El efecto de las vibraciones autoexcitadas se presenta cuando se da un efecto de regeneración relacionado con los parámetros de corte (velocidad del husillo, profundidad de corte y velocidad de avance). Dicho efecto se presenta dentro de la operación de fresado debido a que, por ser un proceso discontinuo, los cortes de material producen marcas en la pieza de trabajo, así como, viruta de espesor variable; de modo que, al realizar cortes subsecuentes estas condiciones ocasionan oscilaciones entre la pieza y el cortador. Dicha vibración también es conocida como chatter debido al ruido estridente que se produce a través del corte.

De igual forma, este tipo de vibraciones es de las más indeseables debido al impacto que tienen sobre la calidad de las piezas manufacturadas y de los daños que sufren los componentes del sistema. Los modelos capaces de representar el comportamiento del proceso de fresado son mucho más complejos que aquellos que representan procesos continuos. Sin embargo, durante los

últimos años se han logrado importantes avances en la obtención de buenas aproximaciones para la estabilidad del proceso de fresado.

Contar con un modelo matemático proporciona las herramientas necesarias para estudiar adecuadamente el comportamiento de los sistemas bajo diversas condiciones de análisis y, posibilita la predicción o creación de indicadores a partir del pronóstico sobre el comportamiento de los mismos posibilitando su optimización. De este modo, el modelado de sistemas permite determinar las relaciones presentes entre los atributos (calidad, función y costo), con el fin de comprender su comportamiento o reproducir su evolución temporal bajo ciertas condiciones mediante simulaciones. El modelo teórico utilizado para representar el caso general de la dinámica de las vibraciones autoexcitadas en el proceso de fresado está dado por la ecuación siguiente (Cordes, Hintze, & Altintas, 2019):

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = F(t) \dots (3)$$

Se observa un modelo de parámetros concentrados en donde $x(t)$ es el desplazamiento; m es la masa; c es la constante de amortiguamiento y k la constante del resorte. El lado derecho de la ecuación describe un retardo temporal debido al efecto regenerativo de las vibraciones e incluye términos no lineales que describen la formación de viruta.

Por otro lado, en la figura 17 se ilustra la dinámica del modelo de un grado de libertad para el proceso de fresado según T. Insperger y G. Stépán (Insperger & Stépán, 2011); donde profundidad de corte axial (a), fuerzas de corte tangencial (K_t) y fuerza de corte normal (K_n).

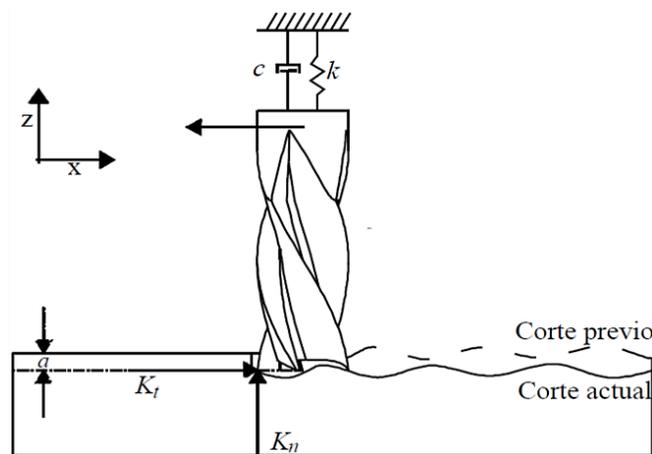


Figura 17. Esquemática de la dinámica para un grado de libertad en el proceso de fresado (Insperger & Stépán, 2011).

El modelo que caracteriza el proceso de fresado propuesto por T. Insperger y G. Stépán se muestra a continuación:

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = R(t) \cdot a[x(t - \tau) - x(t)] \dots (4)$$

En este modelo $R(t)$ representa una fuerza de corte resultante; a la profundidad de corte; $x(t - \tau)$ es el corte previo donde se presenta un retardo τ igual al periodo de giro de la herramienta.

Para caracterizar de mejor manera lo que sucede en la práctica, se selecciona un modelo de dos grados de libertad. De esta manera se garantiza una determinación más precisa de los efectos de la vibración dentro del proceso de fresado. De este modo, el modelo de dos grados de libertad desarrollado por Yusuf Altintas (Altintas Y. , 2012) es de los más aceptados en la literatura.

El modelo propuesto descompone la dinámica asociada al proceso en la dirección de avance y la dirección normal de la herramienta. La dinámica del sistema se representa a través de las siguientes ecuaciones:

$$m_x \ddot{x}(t) + c_x \dot{x}(t) + k_x x(t) = \sum_{j=1}^N F_{xj}(t) \dots (5)$$

$$m_y \ddot{y}(t) + c_y \dot{y}(t) + k_y y(t) = \sum_{j=1}^N F_{yj}(t) \dots (6)$$

En donde, $i = x, y$; m_i representa la masa; c_i el amortiguamiento y k_i la rigidez del sistema en la dirección de avance x y normal y .

La figura 18 representa la dinámica del modelo de dos grados de libertad y permite una mejor comprensión del modelo mostrado en la ecuación 3 y 4. Donde, número de dientes (j), ángulo instantáneo de inmersión (φ_j), ángulo de entrada (φ_{st}), ángulo de salida (φ_{ex}), fuerza tangencial (F_t) y fuerza radial (F_r).

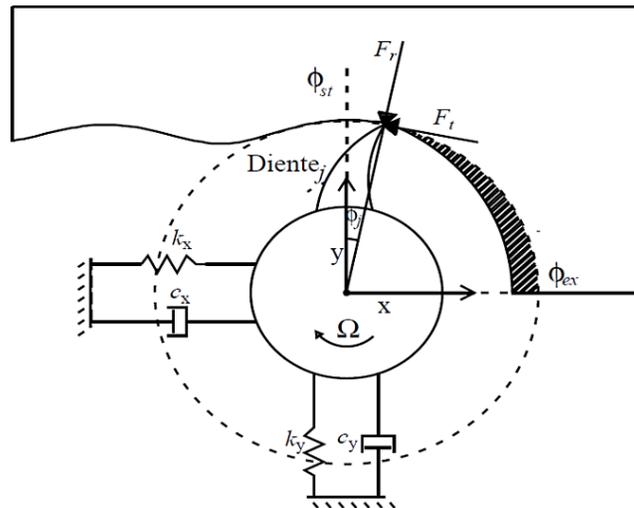


Figura 18. Esquemización de la dinámica para dos grados de libertad en el proceso de fresado (Altintas Y. , 2012).

2.4 Análisis de chatter

Las vibraciones autoexcitadas o chatter son las vibraciones que se generan durante las operaciones corte bajo la acción continua de una fuerza de excitación externa aperiódica (no exhibe un patrón o ciclo que se repita en el tiempo) producida por la fuerza de vibración relativa entre la herramienta y la pieza de trabajo durante el proceso de corte. Dicho problema se ha analizado desde épocas tempranas, en 1907 comenzó a estudiarse por Taylor (Caixu & et al, 2019). Hasta ahora, las condiciones de chatter han sido analizadas por más de un siglo, y pese a ello aún es uno de los mayores obstáculos para los procesos de maquinado por computadora (CNC) como torneado, fresado y barrenado (Fig. 19).

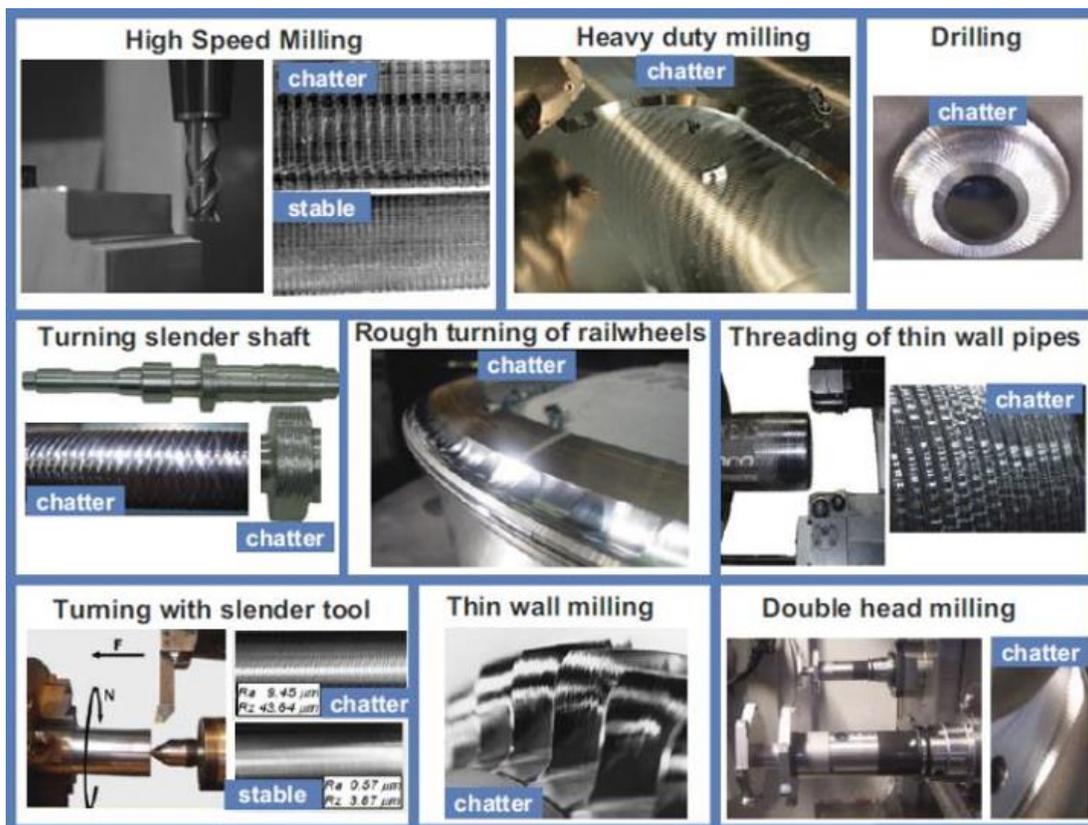


Figura 19. Problemas de chatter en los procesos de corte (Caixu & et al, 2019).

Dada la flexibilidad de los sistemas de maquinado, el problema de inestabilidad por chatter, es siempre inevitable durante el proceso de maquinado (Qin, Tao, & et al, 2020). Las condiciones de chatter en los procesos de corte pueden traer consigo factores desfavorables. Entre ellos, la calidad superficial puede verse afectada, la exactitud de las piezas de trabajo se ve reducida, se producen sonidos estridentes dentro del proceso, acelerado proceso de desgaste de las herramientas, generación de inestabilidad en el proceso, etcétera.

De este modo, de acuerdo con las características de las vibraciones autoexcitadas, la condición de chatter puede dividirse en tres tipos: chatter friccional, chatter de acoplamiento modal y chatter regenerativo (Faassen, 2007). El *chatter friccional* es ocasionado por el efecto de la interacción entre la herramienta y la pieza de trabajo en la misma dirección y con igual velocidad de corte. La *vibración por acoplamiento modal* se debe al acoplamiento de dos modos naturales de vibración debido a la ligera diferencia entre la rigidez de los elementos involucrados en dos direcciones distintas.

Por último, el *chatter regenerativo* se ocasiona por la diferencia entre el espesor de la viruta como resultado de las diferencias de profundidad y dirección ocasionados por los patrones de forma generados en procesos previos y los cortes posteriores (Caixu & et al, 2019). El chatter regenerativo es un tipo de vibraciones autogeneradas y cuyo fenómeno es indeseable no solo en los procesos tradicionales sino también durante la micro manufactura. A pesar de que muchos investigadores han estudiado las condiciones de chatter, los modelos utilizados son en su mayoría en dos dimensiones y multigrado de libertad con muchas consideraciones de simplificación.

Las vibraciones autoexcitadas no solo reducen la eficiencia de los procesos, precisión del maquinado, y vida de la maquinaria y las herramientas, puesto que también resultan en exceso de desperdicio de material y contaminación auditiva, reduciendo en gran medida la sustentabilidad del proceso (Mokhtari, Mahdi Jalili, & et al, 2019). Para eliminar los efectos nocivos generados por el chatter se han utilizado diversos métodos para su eliminación y algunos de ellos se centran en la modificación del proceso de modo que estos se mantengan estables y así reducir el efecto de las vibraciones.

Capítulo 3: Estudios preliminares

«La ciencia puede divertirnos y fascinarnos, pero es la ingeniería la que cambia el mundo».

– Isaac Asimov –

3.1 Clasificación y métodos

En la sección 2.4 se estudió que las vibraciones autoexcitadas (chatter) siempre serán un problema presente durante el proceso de maquinado. Por estas razones, para minimizar la ocurrencia de chatter, se requiere la selección de las combinaciones adecuadas de parámetros de maquinado basados en el análisis de estabilidad del proceso. En orden de, monitorear el proceso de manufactura para proveer resultados satisfactorios, puede haber diversos tipos de sensores, procesamiento de señales, y técnicas de predicción de acuerdo a un parámetro de análisis.

Las tendencias recientes en manufactura se centran en el desarrollo de sistemas inteligentes, autoajustables y que no requieran atención permanente para mejorar la productividad. Como reportó en el pasado la Academia Internacional de Ingeniería de Producción, la confiabilidad de dichos sistemas depende altamente de la disponibilidad de sensores amigables con la industria y métodos robustos para omitir falsas alarmas y con ello acciones incorrectas dentro de los procesos. Prueba de ello son, los esfuerzos en el campo del mecanizado asistido mediante sensores (Jasiewicz & Miodlicki, 2019).

Las principales aplicaciones se centran en el monitoreo del desgaste y rotura de las herramientas, detección de las vibraciones autogeneradas (chatter) y su disminución, controles adaptativos para las fuerzas presentes en los procesos y errores dimensionales, compensación térmica de las máquinas, control de colisiones y monitoreo de las velocidades de giro de los husillos. Se han utilizado una gran variedad de sensores según sus características: de fuerza, visión, emisión acústica, vibración, potencia, esfuerzo, termopares y dispositivos láser dependiendo de la aplicación (Kumar & et al, 2018).

La confiabilidad de las condiciones de la herramienta y los sistemas de control del proceso de maquinado a través de su monitoreo se ve sesgada principalmente por las dificultades de instalación de sensores prácticos y confiables al interior de los equipos, y al no ser capaces de distinguir el estado actual de los procesos y sus efectos sobre las características geométricas a lo largo de las trayectorias de la herramienta (Altintas & Aslan, 2017).

La calidad superficial, el desgaste de las herramientas y la productividad de los procesos disminuyen debido a la aparición de las vibraciones autoexcitadas. Por lo tanto, las investigaciones a lo largo de los años se han centrado en encontrar el modo de minimizar su impacto sobre las piezas de manufactura. La figura 20 muestra cual ha sido el avance y la tendencia de acuerdo con el número de publicaciones por año de 1995 a 2019 (Zhu & Liu, 2020).

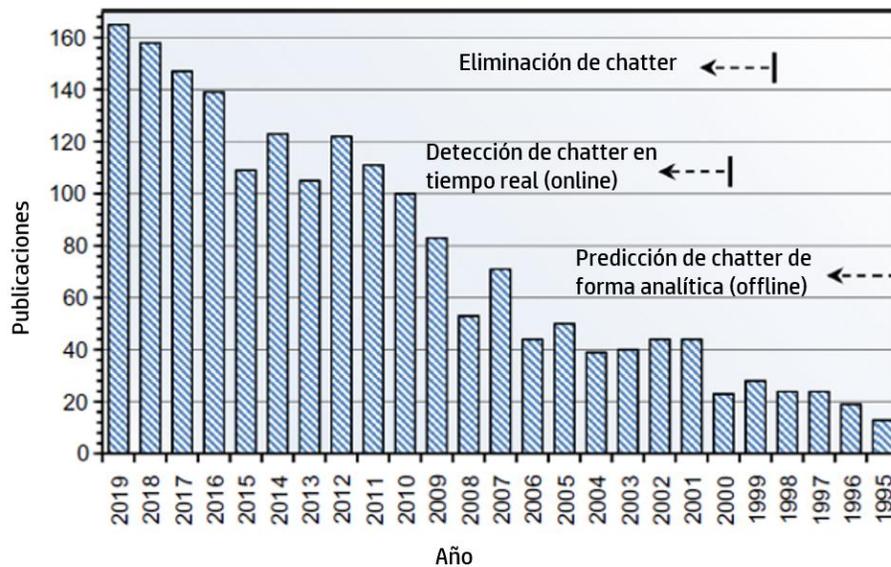


Figura 20. Número de publicaciones de chatter en el proceso de fresado (Zhu & Liu, 2020).

Con base en la información mostrada se observa que el número de publicaciones se ha incrementado significativamente, particularmente en la última década. La literatura muestra un amplio número de investigaciones sobre el análisis de chatter; la información de las investigaciones muestra la tendencia sobre el estudio de las vibraciones autoexcitadas.

Las investigaciones sobre las vibraciones se encaminan en tres áreas (Fig. 18): predicción de chatter de forma analítica (offline), detección de chatter para modificación del proceso en tiempo real (online) y la eliminación de chatter en tiempo real; se muestra la relación que existe entre ellas en la figura 21 (Zhu & Liu, 2020). En dónde se esquematizan los pasos a seguir para el estudio del comportamiento de las vibraciones autoexcitadas según su forma de adquisición. Y se destaca la necesidad de contar con un proceso de verificación manual al final de cada una de las interacciones con el proceso (Cao, Zhang, & Chen, 2017).

Para el estudio de las áreas se cuenta con diversas técnicas que se adaptan a los procesos de arranque de viruta y que pueden expresarse como (Zhu & Liu, 2020):

1. *Integración de las unidades de predicción: detección y supresión de chatter dentro de máquinas herramientas u husillos inteligentes.* Puede integrarse a las máquinas de fresado de alta velocidad de tres y cinco ejes que son generalmente utilizadas para crear superficies con formas libres para moldes y matrices, la industria aeronáutica o biomédica. Varias fuentes de desviaciones geométricas en las piezas provienen de los

elementos involucrados dentro del proceso de manufactura. Dichos errores, por ejemplo, provienen de los programas de CAM, de la maquinaria CNC, estática, dinámica y temperatura de la máquina o de los errores relacionados al proceso (geometría de la herramienta, desviación de la herramienta, vibraciones, formación de viruta, entre otros) (Uhlmann, Abackerli, & et al, 2014).

La interpolación de la trayectoria puede ser una fuente principal de error con respecto a la productividad y calidad del maquinado de las superficies con forma libre. Comúnmente el proceso de maquinado se asiste de la manufactura por computadora (CAM) dónde el software genera trayectorias aproximadas para las herramientas. Sin embargo, dichas trayectorias poseen limitantes toda vez que se implementan en la maquinaria CNC, por lo que, el incremento de la velocidad de remoción de material, reducción de la durabilidad de la herramienta, mejora del acabado superficial, interpolación de trayectoria, etc. Son causantes de marcas en las piezas terminadas, e incluso, en las estrategias de maquinado con 3 o 5 ejes se encuentran los mismos problemas respecto de la discretización de la trayectoria de la herramienta el cual reduce el desempeño del proceso de maquinado (Beudaert, Lavernhe, & Tournier, 2014).

2. *Transmisión inalámbrica: en tiempo real dentro del espectro de frecuencia.* La corriente del motor, velocidad, y aceleración de cada controlador, la trayectoria de la herramienta, la velocidad de giro del husillo y su torque, velocidad de alimentación y bloque de ejecución se obtienen de la maquinaria CNC en tiempo real, y se correlacionan con la simulación virtual de la información contenida en un dispositivo externo. La siguiente generación de máquinas CNC necesitan ser autoajustables y organizadas, haciendo uso de cualquier información de sensores disponibles intrínsecamente y un proceso virtual de simulación y realimentación mediante internet o cualquier comunicación digital disponible con recursos internos o externos que asistan el proceso de corte de la maquinaria. A menos que se eludan las vibraciones autoexcitadas, chatter, se producirán acabados superficiales pobres, la vida de las herramientas será menor y, por ende, los límites de productividad en las operaciones de maquinado también (Altintas & Aslan, 2017).
3. *Procesamiento avanzado de datos: en tiempo real y métodos de toma de decisiones.* El problema de las vibraciones autoexcitadas se incrementa particularmente en piezas de baja dureza. De este modo a lo largo del tiempo se han desarrollado teorías y aproximaciones que se centran en la eliminación del efecto negativo de dicho fenómeno. Algunos métodos se centran en la modificación del proceso para que este se vuelva estable, como fue la eliminación de la vibración activa mediante amortiguadores o componentes activos de la máquina herramienta utilizada (Dunaj, Berczynsky, & Dolata, 2019).

Otra aproximación se centra en el uso de las redes neuronales para predecir las condiciones de chatter. Un grupo significativo de investigadores se ha centrado en la

búsqueda de la estabilidad de los procesos. En este grupo de métodos, la búsqueda de estabilidad tiene lugar en el plano de los parámetros tecnológicos; el objetivo de estos procedimientos es encontrar velocidades de giro y profundidades de corte donde las vibraciones autoexcitadas no se presenten (Dunaj, Berczynsky, & Dolata, 2019).

A través de medios experimentales, se llevan a cabo una serie de pruebas de impulso, en donde los componentes son excitados mediante el golpeteo de un martillo modal (o de impacto) y se obtiene la respuesta del sistema a través de acelerómetros. Esto es un método ampliamente utilizado, y se caracteriza por su alta fiabilidad, sin embargo, el procedimiento requiere de tiempo para la instrumentación de la maquinaria y es necesario contar con personal y equipo de adquisición especializado. Otro acercamiento es el modelado de sistemas dinámicos de las máquinas herramientas utilizando el método de elemento finito (Dunaj, Marchelek, & Chodźko, 2019).

Otra alternativa de acercamiento es hacer uso de métodos de síntesis modal como acoplamiento de recepción, el cual combina las ventajas de los métodos experimentales y analíticos. Permite determinar las propiedades dinámicas del sistema, con un modelo experimental de la maquinaria y un modelo analíticamente evaluado para la herramienta de fresado. Este tipo de experimentación facilita la rápida determinación de las propiedades dinámicas de la máquina herramienta dentro de las aplicaciones industriales, además, no se requiere de personal o equipo altamente especializado para su implementación.

4. *Sistema de monitoreo integrado para chatter: enfocado en piezas de pared delgada y superficies.* El maquinado mediante vibración asistida (VAM) es una técnica en la que la amplitud y frecuencia de vibraciones externas se superponen a los movimientos de corte base. La característica principal del método es la separación existente entre la pieza de trabajo y la herramienta que se ocasiona por la asistencia de vibraciones (Khasawneh & Munch, 2016).

Los operadores calificados de maquinaria de control numérico por computadora (CNC) deben poseer un amplio conocimiento en el campo de la tecnología de maquinado, particularmente a la luz de la creciente demanda en cuanto al tiempo de maquinado, nuevos métodos de calidad superficial, inspección topográfica y la miniaturización constante que requiere de tolerancias en el orden de micras. Las herramientas de maquinado también se encuentran en un desarrollo constante y extendido con modernos y complejos sistemas como, compensaciones de errores térmicos, sistemas de escaneo basados en visión 3D, para el posicionamiento de las piezas de trabajo. Este tipo de sistemas complica el proceso de programación, el cual requiere de conocimiento específico del operador de la maquinaria (Nieslony, Krolczyk, & et al, 2018).

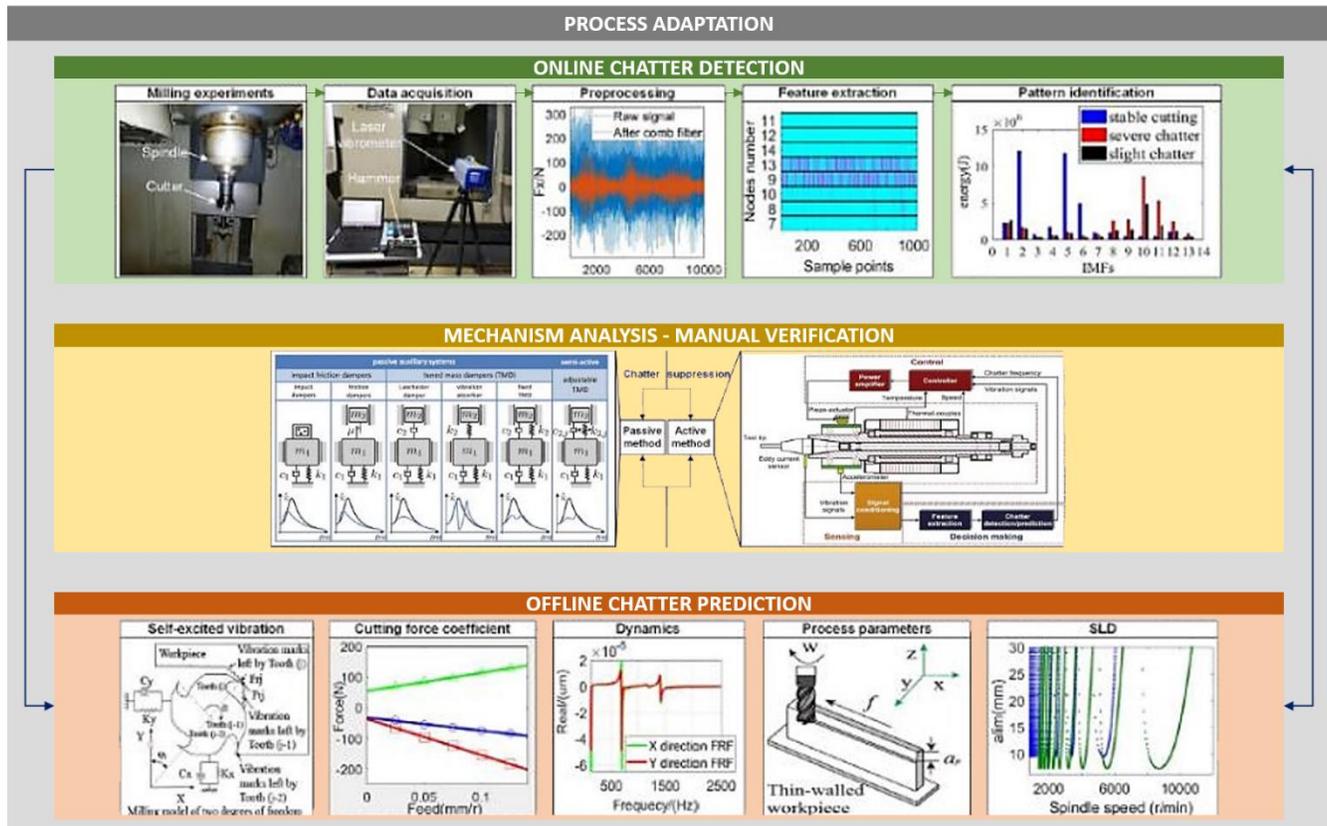


Figura 21. Relación entre los tipos de chatter: online, offline y supresión (Zhu & Liu, 2020).

Elementos de adquisición de señales

Para lograr una adecuada implementación de las técnicas anteriormente señaladas es necesario contar con sensores para la adquisición de las señales de vibración.

A la fecha se han utilizado diversos sensores, principalmente basados en las señales de fuerza durante el corte, vibraciones mecánicas, emisiones acústicas, sonido y potencia consumida. En cuanto a las metodologías de procesamiento de señales (Tabla 2), la mayoría de los estudios se centra en métodos no avanzados para el análisis, que son fáciles de aplicar con sistemas computacionales de bajo costo como: análisis directo en el tiempo (TDA), transformada rápida de Fourier (FFT), y densidad de potencia espectral (PSD). Los métodos avanzados de procesamiento como el análisis espectral singular (SSA), y la transformación de empaquetado de onda (WPT), no se utilizan con frecuencia debido a su complejidad y alto costo analítico-computacional. Un arreglo de técnicas predictivas también puede estimarse como una técnica de regresión multivariable, redes neuronales, y máquinas de soporte vectorial (García Plaza, Núñez López, & Beamud González, 2019).

Tabla 2. Clasificación de metodologías para la adquisición de señales.

Metodologías	Clasificación específica	Ventajas	Desventajas
Dominio de frecuencia	Aproximación de orden cero Método de multifrecuencia	-Comportamiento preciso -Algoritmos de fácil implementación -Fácilmente ampliable	-Dificultad de diseño -Necesita procesadores de alta gama
Dominio del tiempo	Simulación numérica Método de semi discretización Diferencias finitas Análisis directo	-Fácil de programar -Buena precisión -Flexible en el manejo de información	-Número elevado de iteraciones -Requiere de análisis de convergencia y estabilidad
Otros métodos	Transformación de empaquetado de onda Análisis espectral singular	-Puede utilizarse para encontrar patrones de comportamiento -Generar indicadores -Puede utilizarse en series de cualquier periodicidad	-Las transformaciones pueden alterar el espectro -No utiliza las muestras de manera eficiente

La fiabilidad de dichos sistemas depende en gran medida de la disponibilidad de sensores, su adaptación con la industria y la robustez de los métodos para evadir acciones incorrectas por falsas alarmas. Se han realizado grandes esfuerzos en el campo del mecanizado asistido por sensores. Las aplicaciones principales se centraron en el monitoreo del desgaste y la rotura de la herramienta, la detección y evasión de vibraciones, el control adaptativo de las fuerzas del proceso y los errores dimensionales, la compensación térmica de las máquinas, la prevención de colisiones y el monitoreo del estado del husillo (Koike, Ohnishi, & Aoyama, 2016).

La fiabilidad de los sistemas sobre la condición de las herramientas y el proceso de maquinado ha tenido dificultades debido a la implementación tecnológica de los sensores en la máquina y en la dificultad de identificar los efectos del proceso de maquinado ocasionados por los cambios en la geometría a lo largo de la trayectoria de la herramienta. La simulación virtual del mecanizado de piezas puede contribuir a la alimentación de datos que se necesitan para mejorar la solidez de los sistemas de control durante el proceso de corte, así como, mantener un monitoreo constante del estado de las herramientas (Altintas & Aslan, 2017).

De este modo, la detección automática de chatter y cómo evitarlo se ha convertido en una meta importante. Existen varios métodos de adquisición de señales para chatter reportados en la literatura, que se han clasificado como aproximaciones directas o indirectas. En la aproximación directa, la investigación intenta detectar las vibraciones "en línea" haciendo uso de sensores

externos como micrófonos, acelerómetros, sensores de emisión acústica o dinamómetros (Denis & Altintas, 2018).

En la aproximación indirecta, las vibraciones son detectadas por la estimación de las señales del proceso (fuerzas, torques, vibraciones) desde sensores que se montan al husillo, boquilla o desde los motores y encoders. La ocurrencia de vibraciones autoexcitadas (chatter) es una de las principales razones por las que la eficiencia de los maquinados se ve limitada.

Mecanismo de análisis de chatter: lóbulos de estabilidad

El rasgo característico y determinante sobre la formación de chatter son las huellas dejadas por las herramientas durante sus operaciones (Zatarain & et al, 2006). La herramienta básica para el análisis de chatter se conoce como lóbulos de estabilidad, la cual relaciona la profundidad de corte a la cual el efecto de las vibraciones puede incidir sobre las operaciones de maquinado como función de la velocidad de rotación del husillo. En orden de determinar los lóbulos de estabilidad, primero, es necesario conocer las propiedades dinámicas de la máquina-herramienta-pieza de trabajo, expresada como una función de respuesta en la frecuencia.

La base para estudiar el fenómeno de vibración regenerativa es analizar el modelo matemático el cual está representado en la forma de una ecuación diferencial con retraso en el tiempo (DDE), que es un caso especial de las ecuaciones diferenciales ordinarias. El instrumento propicio para la selección de estos parámetros se conoce como lóbulos de estabilidad, y permiten visualizar la profundidad de corte a la que las condiciones de chatter pueden darse en función de la velocidad de giro del husillo en la maquinaria (Jasiewicz & Miądlicki, 2019).

En orden de determinar los lóbulos de estabilidad, primero, es necesario conocer las propiedades dinámicas de la máquina herramienta y la pieza de trabajo a través de los elementos de adquisición de señales como una función de respuesta en frecuencia (FRF, por sus siglas en inglés). Es posible determinar la respuesta en frecuencia de diversas maneras (Jasiewicz & Miądlicki, 2019). De este modo, el método combinado de detección de vibraciones mediante acelerómetros y los lóbulos de estabilidad permitirán la obtención de un modelo que aproxima al modelo físico para así predecir su comportamiento.

La predicción de vibraciones autoexcitadas es un método para la estabilización del proceso mediante la selección apropiada de los parámetros de corte y que usualmente se obtienen a través de un diagrama de lóbulos de estabilidad (SLD). A través de los lóbulos pueden identificarse los límites de profundidad de corte a una determinada velocidad de giro del husillo, determinando así las condiciones de mecanizado más estables.

El procedimiento para la obtención del diagrama se describe en la figura 22 (Munoa, Beudaert, & et al, 2016) y es de suma importancia ya que puede lograr predicciones razonablemente precisas y con ello dar una solución más rápida a las ecuaciones diferenciales con

retardo (DDEs) presentes en el proceso (Quintana, Ciurana, & Teixidor, 2008) (Insperger & Stépán, 2011) (Paliwal & Ramesh Babu, 2020) (Iturgaiz Ibañez, Jose Arrazola, & Bonde Ørskov, 2020).

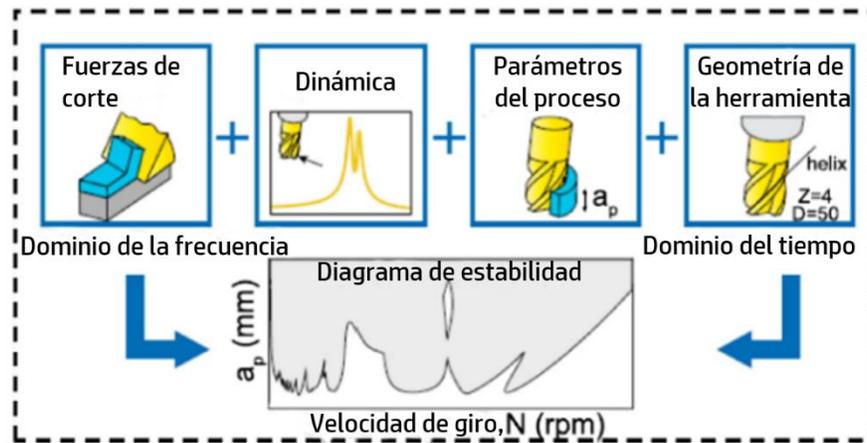


Figura 22. Procedimiento para la obtención del diagrama de lóbulos de estabilidad (SLD) (Munoa, Beudaert, & et al, 2016).

Entre los elementos mostrados, se observan los coeficientes de las fuerzas de corte (CFCs) y el comportamiento dinámico como dos entradas relevantes. La precisión de los CFCs desempeña un papel fundamental para la predicción de una fuerza de corte confiable. En cuanto a los métodos de identificación, los métodos tradicionales incluyen el de identificación mecanicista y la transformación ortogonal oblicua. Por lo general, se requiere de una gran cantidad de pruebas de corte y la fuerza promedio por revolución durante el proceso de identificación para ambos métodos (Ahmadi & Altintas, 2014).

La idea principal sobre el uso del diagrama de estabilidad, se centra en el hecho de que los problemas de chatter pueden ser resueltos a través de la optimización de parámetros de proceso como la profundidad de corte (a) y la velocidad de giro del husillo (N) respectivamente. El SLD se construye utilizando un modelo alimentado con cuatro entradas distintas: los coeficientes de corte o las fuerzas específicas que describen el proceso de corte, los parámetros dinámicos del sistema y los parámetros del proceso, así como, la geometría de la herramienta (Ahmadi & Altintas, 2014).

La *fuerza de corte* se caracteriza mediante modelos matemáticos alimentados con coeficientes de corte o información específica de las fuerzas de corte. Los coeficientes de corte representan el límite elástico del material, la fricción que se ejerce entre la herramienta y la pieza de trabajo y la geometría de la herramienta. La fuerza de corte se expresa como un producto del coeficiente de corte y el área de la viruta, por lo tanto, actúa como una ganancia en la dinámica de circuito cerrado del sistema regenerativo (Iglesias, Munoa, & Ciurana, 2014).

Los coeficientes de corte se obtienen de forma mecánica al correlacionar las fuerzas medidas contra el área de la viruta realizando pruebas de corte con la herramienta o transformando el esfuerzo cortante, el ángulo de corte, y el coeficiente de fricción obtenidos en las pruebas de corte con la herramienta correspondiente para la obtención de la geometría. Los *parámetros dinámicos* del sistema se miden experimentalmente a través de cualquiera de las técnicas experimentales disponibles. El objetivo de la medición es capturar las vibraciones generadas por el contacto de la herramienta con la pieza de trabajo en los momentos críticos que limitan la productividad del proceso (Iglesias, Munoa, & Ciurana, 2014).

Dependiendo de las características del proceso de corte, los parámetros dinámicos pueden variar y, por lo tanto, puede ser necesaria la identificación de varias funciones de respuesta en frecuencia (FRF). En operaciones de más de 3 ejes, las mediciones deben realizarse en diferentes posiciones sobre el área de trabajo de los equipos. En el caso del mecanizado de paredes delgadas, las propiedades dinámicas también pueden cambiar a medida que se realiza la remoción de material. Este efecto aumenta la complejidad de la caracterización dinámica (Monnin, Kuster, & Wegener, 2014).

Los *parámetros del proceso*, como la herramienta de corte o el acoplamiento de la pieza, son necesarios para el modelo de estabilidad. El acoplamiento puede variar según el tipo de operaciones a realizar sobre la pieza de trabajo de manera que, se requiere de una conexión estrecha con el sistema CAM para que a través del entorno de mecanizado pueda obtenerse la información referente a las herramientas, operaciones y trayectorias. En el caso de modelos no lineales también deben considerarse parámetros como la dirección de corte y velocidad de avance (Monnin, Kuster, & Wegener, 2014).

Por último, el modelo de estabilidad requiere las características de *geometría de la herramienta* puesto que, afecta el coeficiente de corte, la cinemática de la operación de mecanizado y las direcciones dinámicas de las fuerzas. Los procesos de corte de metal como el fresado se realizan con una amplia gama de geometrías de herramienta (Monnin, Kuster, & Wegener, 2014).

La literatura reporta intentos como la aproximación de orden cero y método de multi frecuencia (MFM) (Eksioglu, Kilic, & Altintas, 2012) o el método de semi discretización (SDM) (Mohammadi & Ahmadi, 2019) para la unificación de una metodología que permita la obtención de modelos matemáticos para las herramientas de forma sencilla y así, contar con información adecuada para su evaluación numérica. Sin embargo, los intentos de unificación se vuelven complejos respecto de su tiempo de evaluación numérica, lo que lleva a la imposibilidad de obtener regiones estables, por lo que, el diagrama de lóbulos se convierte en una herramienta sencilla y con buenas aproximaciones a los puntos más estables de la señal.

Capítulo 4: Caso de estudio

«La ciencia es el gran antídoto contra el veneno del entusiasmo y la superstición».

– Adam Smith –

4.1 Análisis en tiempo real y para la toma de decisiones

El proceso de monitoreo durante el maquinado constituye la base para determinar el desempeño y condiciones de la maquinaria que permitirán el cumplimiento del objetivo de manufactura deseado (Ratnam, 2016). Y es que, las operaciones de maquinado pueden mejorarse conociendo los parámetros del proceso de corte como velocidad de avance, profundidad de corte, ángulo de corte, tolerancias cerradas y la geometría de la pieza, así como la unidad de control que determina los movimientos relativos entre la herramienta de corte y el área de trabajo (Kumar & et al, 2018). En suma, puede establecerse que el acabado superficial de una pieza dependerá no sólo de los parámetros del proceso sino también de las vibraciones generadas por la herramienta de corte ocasionando desviaciones considerables sobre los valores normales de operación.

De este modo, es comprensible que la rigidez de la materia prima y los elementos de corte tengan un efecto en el aspecto final de las piezas (Sivasakthivel, Velmurugan, & Sudhakaran, 2011). Actualmente, los procesos de manufactura no se centran solo en la fabricación de productos. Ya que, la naturaleza de los productos, los cambios en la demanda, las tecnologías emergentes y las nuevas características de las cadenas de suministro, ocasionan cambios que afectan de forma directa los modelos de negocio de los fabricantes tradicionales.

Por ende, la industria manufacturera en México tiene que poner miras a futuro y comenzar a generar cambios sustanciales en áreas específicas de sus procesos para integrarse de manera eficiente al mundo tecnológicamente conectado y que identifique adecuadamente los riesgos y fallas en sus cadenas productivas para garantizar crecimientos positivos dentro de la economía global (Fig. 23) . Y todo ello, a partir de elementos simples que no generen costos elevados a los procesos y con los que se pueda dar solución rápida y efectiva a los problemas de los procesos de manufactura.



Industria manufacturera

Semáforo de desempeño*



"El principal reto de la industria será recobrar terreno perdido por la pandemia, pero también debe tomarse como una oportunidad para identificar los riesgos y las fallas en las cadenas de suministro, así como mejorar el entendimiento de las necesidades de los clientes y la elasticidad de la demanda. Asimismo, en los próximos meses, la entrada en vigor del T-MEC requerirá parte del esfuerzo para adaptarse al complejo entorno que atraviesa la economía global"

Manuel Nieblas

Socio Líder de Productos Industriales y Manufactura

Pronóstico de crecimiento al cierre de 2020
(con información al mes de junio)

-9.0%

Variación porcentual anual del PIB de la industria manufacturera (crecimiento anual y tasa anual al 1er. Trimestre)



Figura 23. Estadísticas de la industria manufacturera INEGI y SE (INEGI, 2020)(SE, 2020).

En el país la industria de la manufactura, se concentra en pequeñas y medianas empresas que se distribuyen a lo largo del territorio nacional (Fig. 24), las cuales se preocupan por sobrevivir, pasando por alto la formalización del conocimiento. Este conocimiento se transmite de maestro a aprendiz de forma empírica, haciendo uso de reglas de dedo y recomendaciones. Causa probable de que la diseminación del conocimiento no se realice adecuadamente y por ende los procesos productivos continúen presentando periodos estacionarios.



Figura 24. Distribución de la industria manufacturera en México, destacan Coahuila, Nuevo León, Jalisco, Guanajuato, Querétaro, Estado de México, Ciudad de México y Puebla (INEGI, 2020).

Dadas las circunstancias de la manufactura en nuestro país, el presente trabajo propone hacer uso del método científico para la obtención de criterios cuantitativos a partir de la combinación de técnicas, donde la información de las características críticas de vibración y la estabilidad de las operaciones en el fresado por CNC permitan obtener productos con tolerancias cerradas, de gran calidad y repetibilidad para la pequeña y mediana industria de la manufactura. A través de los instrumentos básicos con que se cuente o mediante la sistematización que garantice a través del entendimiento de las diferencias entre el método tradicional y el método científico (Tabla 3) la aplicación del conocimiento en el día a día de los procesos de manufactura.

Tabla 3. Diferencia entre el conocimiento empírico y el científico.

Tipo de conocimiento	Características
 Método empírico	<ul style="list-style-type: none"> • Basado en experiencias • Basado en la repetición • Recolección de información de los procesos sin análisis
 Método científico	<ul style="list-style-type: none"> • Basado en experimentos <ul style="list-style-type: none"> • Análisis de datos • Conclusiones • Resumen y registro de información

La metodología científica (Fig. 25) garantizará la repetición del o los procesos en múltiples ocasiones tomando como base los resultados del proceso en que las condiciones fueron óptimas y de gran calidad.



Figura 25. Establecimiento de la metodología.

1. *Identificación*: el proceso de fresado genera marcas sobre las superficies de los objetos disminuyendo el cierre de tolerancias y la apariencia final de las piezas manufacturadas.
2. *Factores, niveles y rangos*: factores potenciales como la profundidad de corte, trayectoria de operación e índice de amortiguamiento; factores variables como rpm y la geometría de la herramienta y factores perturbadores como la frecuencia natural.
3. *Variables de respuesta*: la información útil del proceso se obtiene a través de la señal adquirida por sensores inerciales.
4. *Elección del diseño experimental*: no se requiere de la manufactura de grandes lotes ni de grandes piezas para la correcta evaluación del proceso. Basta con una muestra de prueba en donde se contemple la materia prima, estrategias, herramienta, sujeción, máquina, parámetros de corte, consumo de energía, acabado superficial y vibraciones durante las operaciones de manufactura.
5. *Experimentación*: se realizarán las operaciones de corte conforme a las trayectorias preestablecidas para la evaluación del proceso.
6. *Análisis*: las señales obtenidas se analizan de acuerdo al tipo y tiempo de operación. Identificando los periodos estables e inestables del proceso y acorde con la información obtenida con el método de análisis (LSD).
7. *Conclusiones y recomendaciones*: Obtenidas las características determinantes del proceso se procede a establecer las recomendaciones cuantitativas sobre las operaciones realizadas para su replicación.

Teniendo conocimiento de los puntos que componen al método científico, se confirmará si:

Hipótesis nula

H_0 : El efecto de chatter en las operaciones de fresado CNC no es determinado por la relación entre la profundidad de corte y la velocidad del husillo y no es posible predecir su estabilidad.

Hipótesis alternativa

H_1 : El efecto de chatter en las operaciones de fresado CNC es determinado por la relación entre la profundidad de corte y la velocidad del husillo y es posible predecir su estabilidad.

Se seguirán los pasos del método científico con el fin de obtener información que permita entender y describir de la manera más adecuada el proceso de identificación de chatter. Correlacionar los elementos permitirá el manejo estadístico de la información con relación a las operaciones dentro del proceso, a través de un procedimiento de identificación en el que los valores de vibración sean de relevancia para las operaciones. El manejo estadístico de la información permitirá la identificación de las características de chatter dentro de las operaciones realizadas para la obtención de las características de acabado superficial en las piezas manufacturadas.

(1) Se *identifican* las características de forma del objeto que pretende manufacturarse. Siendo las características de forma libre (geometría) las más relevantes, ya que la aplicación principal para el objeto de trabajo se da en los moldes prototipo para inyección de plástico o moldes de baja producción, los cuales requieren tolerancias cerradas y características de rugosidad R_a que deben cumplir con altos estándares de calidad para la fabricación de componentes.

(2) A lo largo de la sección 1.4 se ha revisado y encontrado que los *factores* de mayor influencia en las operaciones de ranurado y cajas son la velocidad de alimentación o avance (F), la profundidad de corte axial (a_p) y la velocidad del husillo (S). Sin embargo, no se ha estudiado la influencia de estos parámetros o factores durante la manufactura de superficies libres (Zhu & Liu, 2020). Lo recomendado es realizar la manufactura de superficies libres en equipos CNC de más de 5 o 6 ejes. No obstante, las pequeñas empresas no cuentan con ello debido a la inversión que hay que realizar para su adquisición, de modo que, las condiciones de manufactura deben ajustarse a los equipos de 3 ejes.

(3) Las *variables de respuesta* (G , tiempo) se eligen dados los conceptos básicos estudiados en la sección 2.1 respecto de las señales de vibración, donde la frecuencia natural y el periodo de vibración son elementos que definen el fenómeno y se obtienen a través del montaje del sensor infinite-uptime®, cuyo acelerómetro triaxial se orientó en la dirección de los ejes de la máquina CNC. Las pruebas realizadas para la obtención de los valores de aceleración (G -RMS) y el espectro de frecuencia se adquirieron en intervalos de tiempo de 5 minutos sobre el proceso de acabado de las piezas. La tasa de muestreo utilizada fue de 2 milisegundos (ms) en un rango de frecuencias que va de los 10 Hz y hasta los 3.2kHz.

Las pruebas de corte se implementaron en una fresadora vertical Haas® VF1 de tres ejes, y se utilizaron cortadores de bola Sandvik-Coromant® de 1/8" (3.175 mm) y 1/4" (6.35 mm), las operaciones analizadas corresponden a la fase de acabado de las piezas de estudio; el procesamiento de la información se realizó con un equipo de cómputo portátil con procesador Core i5 de tercera generación y memoria RAM de 6 GB (Fig. 26).



Figura 26. Componentes para la obtención de las variables de respuesta.

Seguidamente, se muestra la información sobre los parámetros de corte utilizados en las repeticiones experimentales (RE) (Tabla 4). Los valores son sugeridos por el proveedor de la herramienta y en relación a ello, examinar las condiciones propuestas para el desarrollo de las operaciones, pudiendo así obtener datos que posibiliten el aumento de la región de operación propuesta. Y, de este modo, a través de la revisión de las condiciones de prueba, establecer cuál es la zona donde el trabajo de corte puede realizarse con el menor grado de defectos superficiales a consecuencia del efecto de vibración sobre las piezas fabricadas. Con lo que, a través del control de movimiento en los ejes X, Y y Z se logre la obtención de las mejores condiciones de acabado y sustentabilidad de las operaciones.

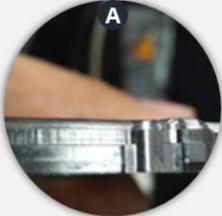
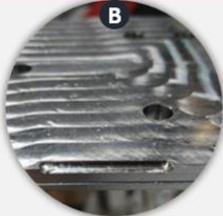
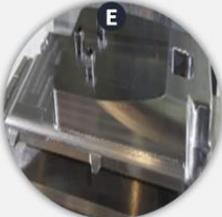
Tabla 4. Parámetros del proceso por Sandvik Coromant Tool Guide® para las repeticiones experimentales (Coromant, Tool Guide, 2020).

Repetición	Velocidad de alimentación $\left[\frac{mm}{min}\right]$	Velocidad del husillo $[rpm]$	Distancia entre pasadas $[mm]$	Profundidad de corte axial $[mm]$
RE1	500	3000	0.025	1.000
RE2	550	3500	0.025	0.500
RE3	600	4000	0.025	0.250

(4) La *elección del diseño experimental*, para el estudio de la influencia de vibraciones en las operaciones de maquinado se utilizó el acero 1045, puesto que su composición química [C (43-50 %), Mn (60-90 %), Si (20-40 %), P (4%) y S (5%)] le aporta buenas propiedades mecánicas. Lo que hace que sea un material de mediana maquinabilidad y atractivo para una amplia gama de usos y aplicaciones entre las que destacan: la fabricación de partes de maquinaria, fabricación de herramientas, moldes prototipo y bases portamoldes.

(5) Para la *experimentación*, se cuenta con la información de materia prima, estrategias de manufactura, herramienta, sujeción, máquina, parámetros de corte y acabado superficial necesarias para las operaciones de acabado de las piezas. Por lo tanto, se realizó la manufactura de tres experimentos (repeticiones) compuestos por dos réplicas en donde se emplearon las herramientas de 1/4" (6.35 mm) y 1/8" (3.175 mm) de punta de bola respectivamente. La tabla 5 muestra los acabados obtenidos al momento de realizar las operaciones de acabado sobre algunas superficies libres.

Tabla 5. Superficies terminadas.

Repetición	Réplica 1 [cortador de 1/4"]	Réplica 2 [cortador de 1/8"]	Característica de acabado superficial
RE1			Superficie con rugosidad (Ra) alta ($\geq 0.32\mu m$)
RE2			Superficie con rugosidad (Ra) media ($\geq 0.25\mu m$)
RE3			Superficie con rugosidad (Ra) baja ($\geq 0.20\mu m$)

En la tabla 4 se muestra el efecto de la vibración sobre las piezas manufacturadas, observando el cambio en la variable de respuesta (G-RMS), dada su apariencia y el nivel de rugosidad alcanzado. De este modo, las repeticiones realizadas permiten entender el comportamiento de las operaciones entre la respuesta media observada (RE2) con $R_a \geq 0.25 \mu m$ en comparación con la respuesta obtenida cuando se encontraba en su primer nivel (RE1) con $R_a \geq 0.32 \mu m$ y en su último nivel (RE3) con $R_a \geq 0.20 \mu m$.

(6) Toda vez que los maquinados correspondientes fueron realizados, se procesa la información obtenida por el sensor infinite-uptime® apoyados en el software MATLAB® para su análisis. La figura 27 muestra los resultados obtenidos para uno de los maquinados realizados. Los gráficos obtenidos relacionan los valores de aceleración (G-RMS) con respecto del tiempo de

acuerdo con la repetición realizada. Sin embargo, la información obtenida para los ejes X, Y y Z muestra la sobreposición de ruido en las muestras, dificultando así, la obtención del periodo de ocurrencia en el que se da el inicio y fin del efecto de las vibraciones.

Por lo que, fue necesario un postprocesamiento de la señal con el fin de identificar los niveles más relevantes de la información.

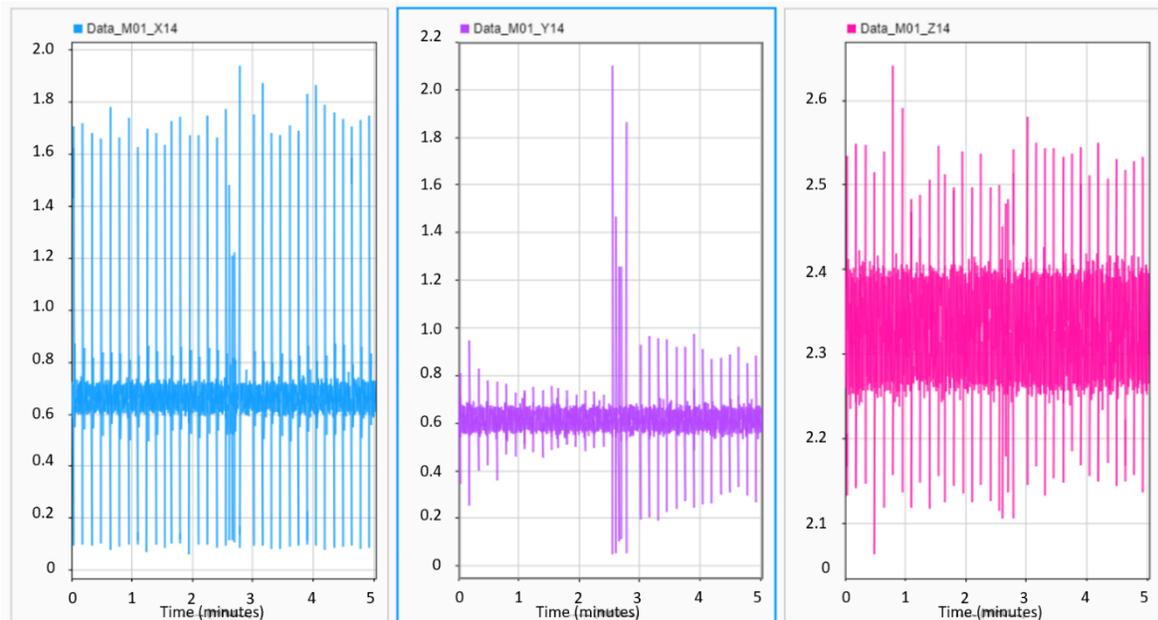


Figura 27. Señal adquirida para el cortador de bola de 1/4" en RE1.

Por lo anterior, se optó por el uso de la *aplicación* para el procesamiento de muestras propia de MATLAB® y así, aplicar una transformada de Wavelet Haar a las señales. Y con ello, obtener los niveles de comparación de la señal, donde el nivel 1, mostrará las características de la señal en alta frecuencia y los niveles más bajos las características de la señal en condiciones de frecuencia inferiores. De igual modo, el valor de 1g (9.81 m/s^2) se consideró como referencia dado que se debe a la acción de la gravedad sobre los objetos y, de esta manera, un valor de G-RMS mayor a 1g implica una mayor energía de vibración y por ende será el principal indicador de condiciones de chatter.

De este modo, toda vez que se realiza la descomposición por nivel se identifica en donde se dan los puntos de mayor amplitud dentro de los niveles de análisis y se encuentran los patrones de recurrencia en el periodo de trabajo. Y así, con la señal reconstruida en el dominio de la frecuencia se logra identificar con mucha mayor claridad cuáles son los puntos que se encuentran por sobre 1g-RMS. Y de igual forma descartar aquella información en la que no se haya encontrado relevancia de vibraciones de acuerdo con el nivel de descomposición. Lo que permitió identificar también, cual es el periodo de ocurrencia de la inestabilidad dentro del proceso.

A continuación, se muestra la descomposición generada para la repetición número uno (RE1):

La figura 28 muestra la descomposición obtenida con respecto del eje X, así como, la zona de disrupción de la muestra que se da entre los 2.5-3 segundos. La figura 29 exhibe mediante una mayor escala, la reconstrucción de la señal ya mencionada, en donde se observan múltiples puntos por sobre 1G-RMS. Sin embargo, esto no presenta un problema, dada la estabilidad de la señal que presenta un comportamiento constante en amplitud con valores entre $1.7 \text{ G-RMS} \pm 0.12\text{G}$.

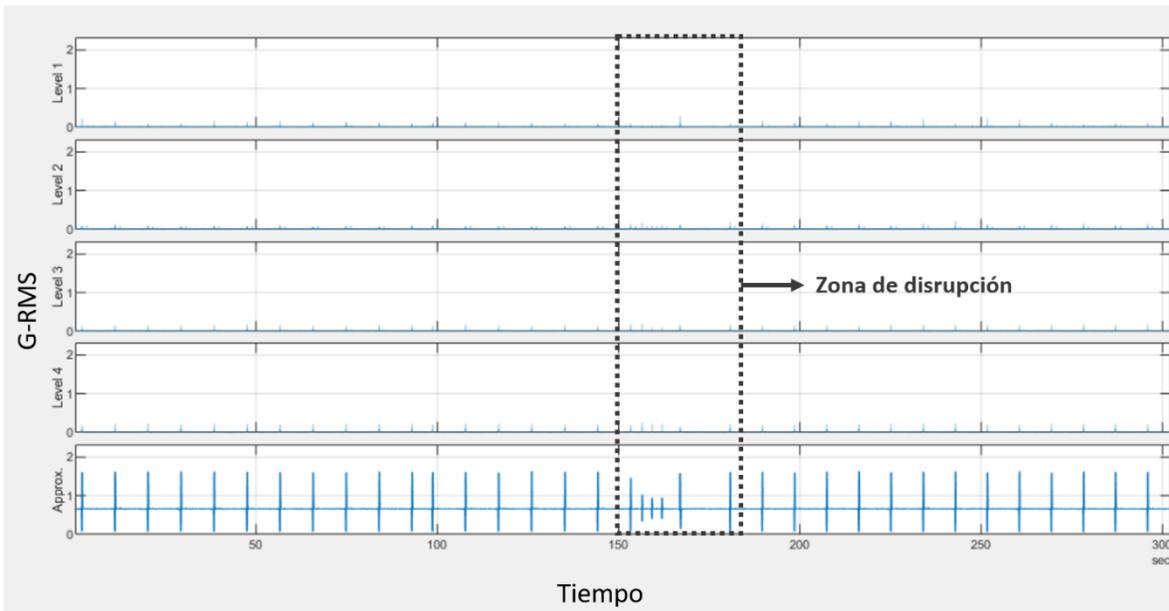


Figura 28. RE1. Descomposición de señal X en la réplica 1 (cortador 1/4”).

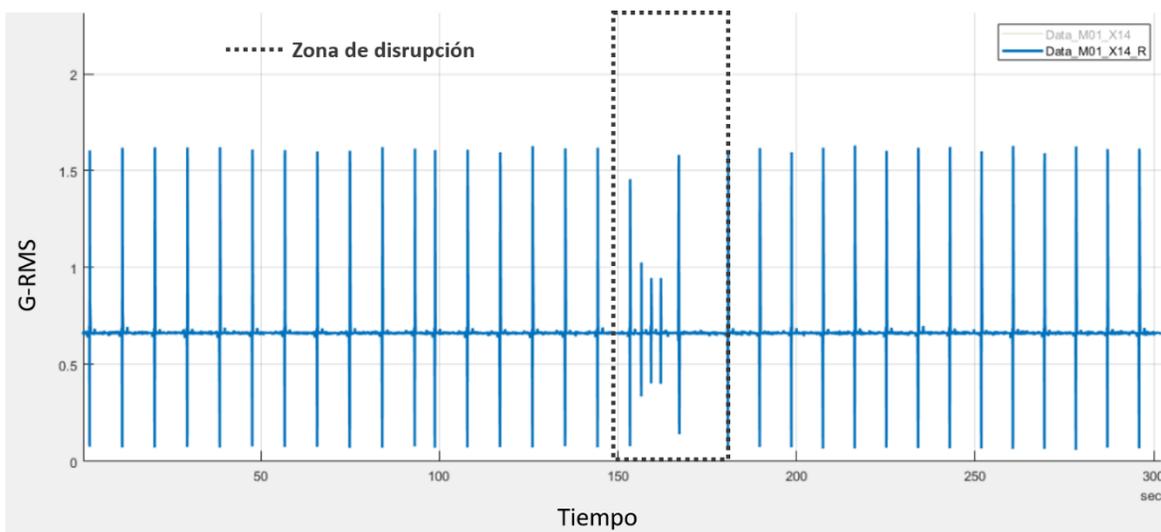


Figura 29. RE1. Reconstrucción de señal X en la réplica 1 (cortador 1/4”).

La figura 30 muestra la descomposición realizada para el eje Y de la primera repetición, en donde se encuentran dos puntos críticos. Estos son identificados en la figura 31 y se dan en el intervalo de tiempo entre 2.5-3 segundos, donde los puntos de mayor interés son señalados mediante etiquetas numéricas. En este caso, el punto 1 representa la amplitud mínima de la señal o inicio de la energía de vibración con un valor de 1.17G y el punto dos la amplitud máxima de 1.58G siendo el de máxima energía de vibración.

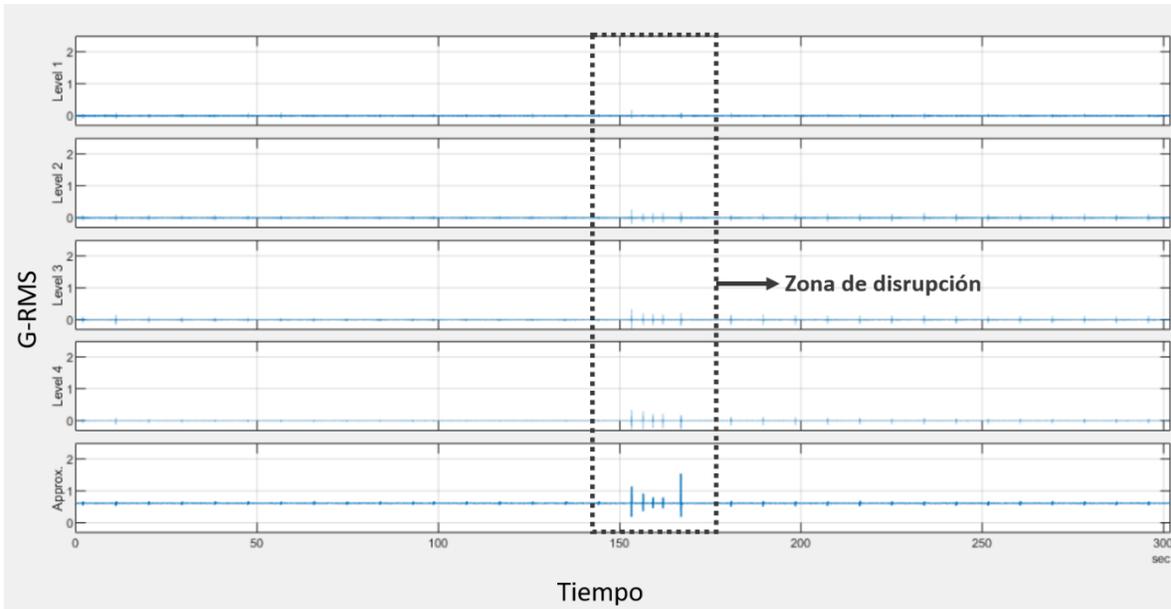


Figura 30. RE1. Descomposición de señal Y en la réplica 1 (cortador 1/4").

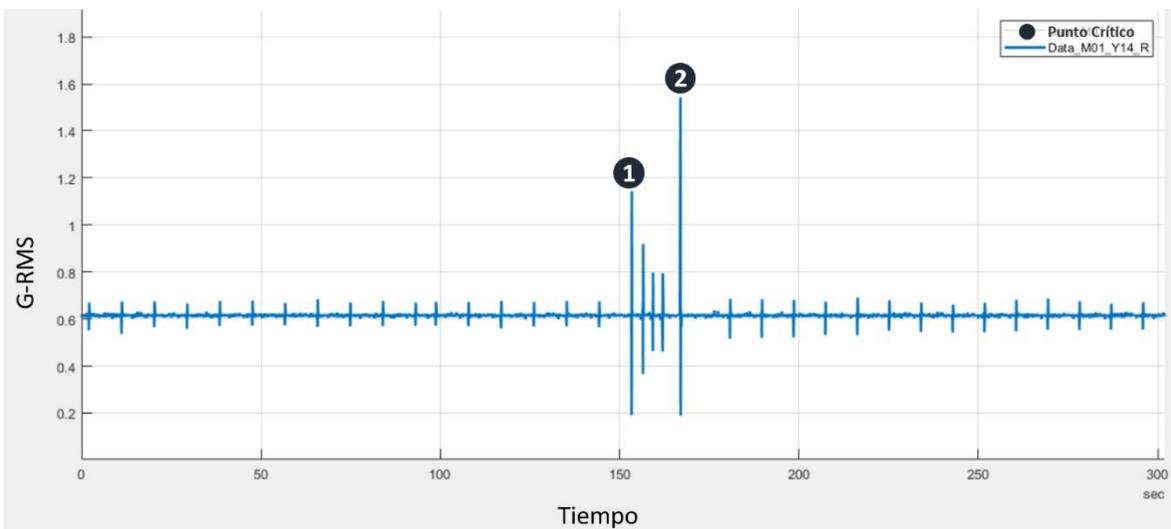


Figura 31. RE1. Reconstrucción de señal Y en la réplica 1 (cortador 1/4").

Por último, se tiene la información del eje Z que realiza los movimientos de las operaciones en la orientación vertical de la máquina CNC. En la figura 32 se observa que la zona de interrupción no presenta componente alguna en el dominio de la frecuencia a lo largo de los niveles de descomposición. La señal de la reconstrucción (Fig. 33) muestra valores de 2G asociados al cabezal y con poca variabilidad a lo largo del tiempo de la operación, lo que es de esperarse dado que éste se encuentra orientado en Z y opera a altas revoluciones por minuto.

Además, dado que el sensor de vibraciones se dispuso sobre la bancada del equipo CNC y es coincidente con la orientación del eje Z, se contribuye al amortiguamiento de las señales vibratorias en el mismo. En consecuencia, la descomposición de la señal muestra que no hay un efecto importante en función de la magnitud de dicha aceleración G-RMS tanto en alta como en baja frecuencia por lo que el efecto de la aceleración G-RMS se considera con efectos mínimos sobre el proceso de acabado de la pieza manufacturada.

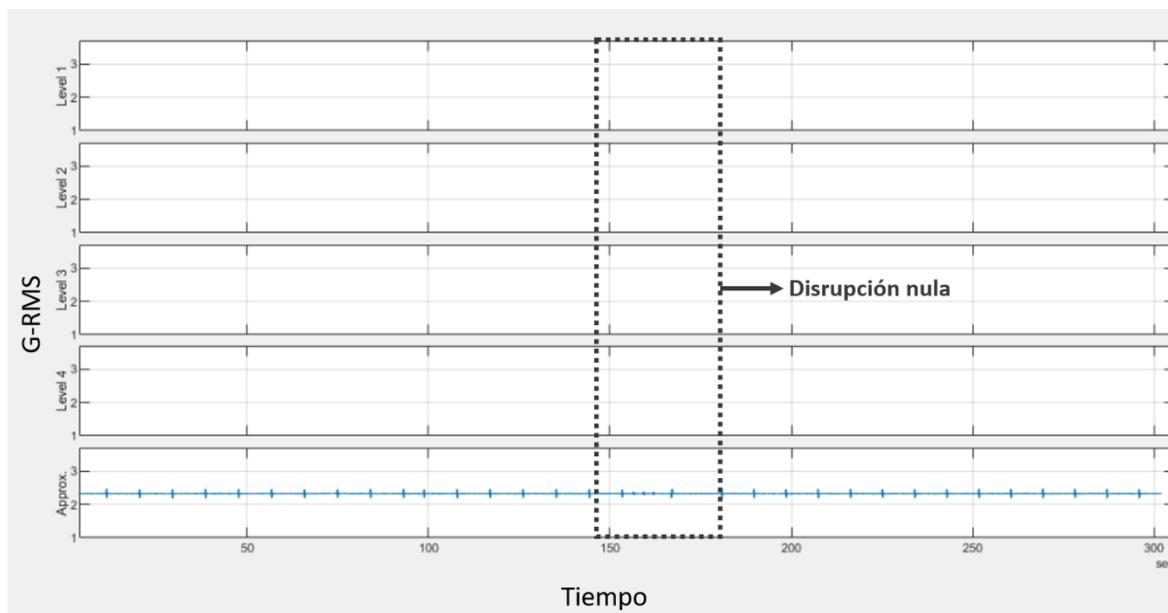


Figura 32. RE1. Descomposición de señal Z en la réplica 1 (cortador 1/4").

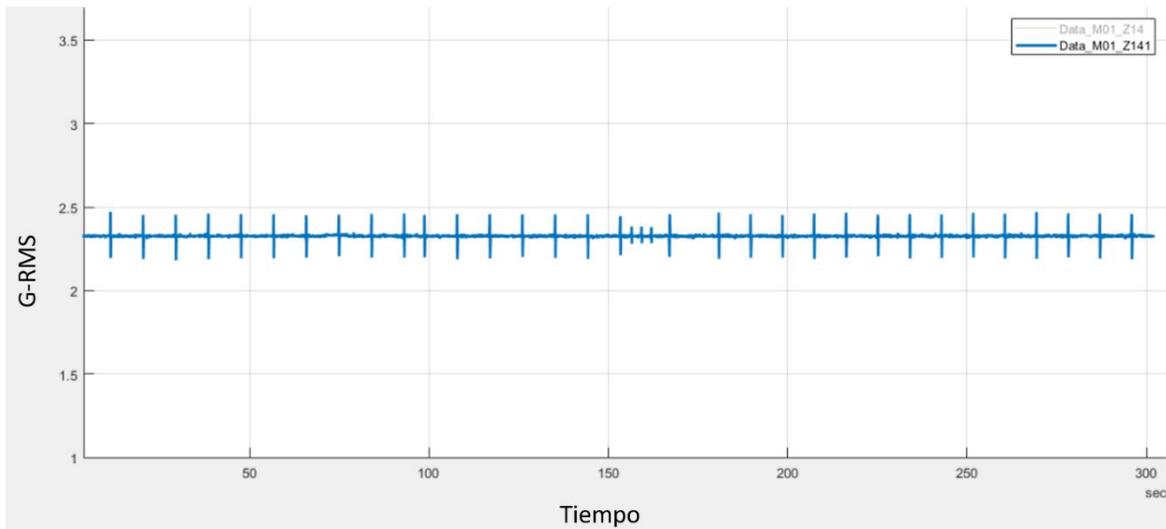


Figura 33. RE1. Reconstrucción de señal Z en la réplica 1 (cortador 1/4”).

Dada la reconstrucción de las señales y a que el eje Z no tiene efectos importantes sobre las operaciones, se decidió no examinar la información de dicho eje para el resto de la experimentación. De igual forma, se identifica que el periodo de la señal se mantiene constante y que la disrupción encontrada coincide con el periodo de tiempo en que se dan las perturbaciones de amplitud en el eje Y. Por esto último, se determina que el eje Y, cuenta con la información más relevante sobre la operación.

A continuación, se muestran los efectos de vibraciones para los ejes X y Y de la segunda réplica en la primera repetición. Donde la figura 34 muestra las disrupciones encontradas en la reconstrucción de la señal para X y la figura 35 los valores críticos de vibración en Y:

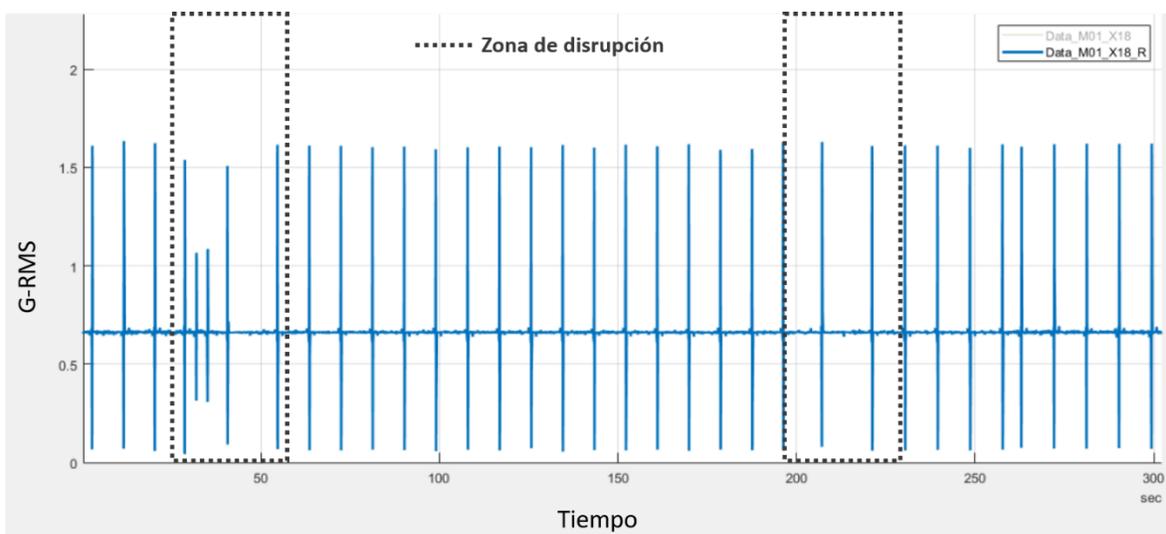


Figura 34. RE1. Reconstrucción de señal X en la réplica 2 (cortador 1/8”).

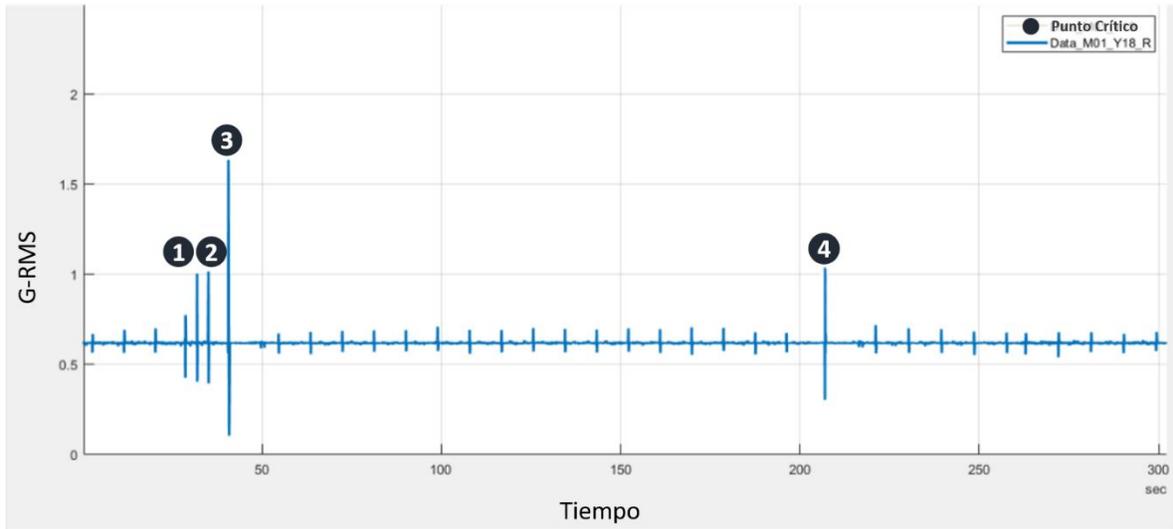


Figura 35. RE1. Reconstrucción de señal Y en la réplica 2 (cortador 1/8”).

Continuando con el resto de la experimentación, se muestra la información correspondiente para la repetición dos (Fig. 36-39), con la información correspondiente a sus dos réplicas:

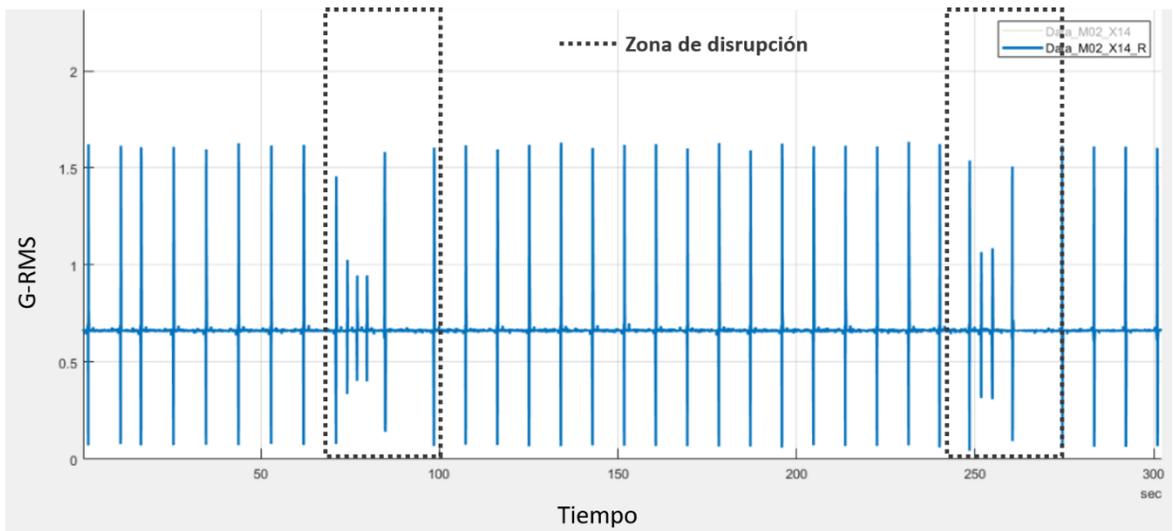


Figura 36. RE2. Reconstrucción de señal X en la réplica 1 (cortador 1/4”).

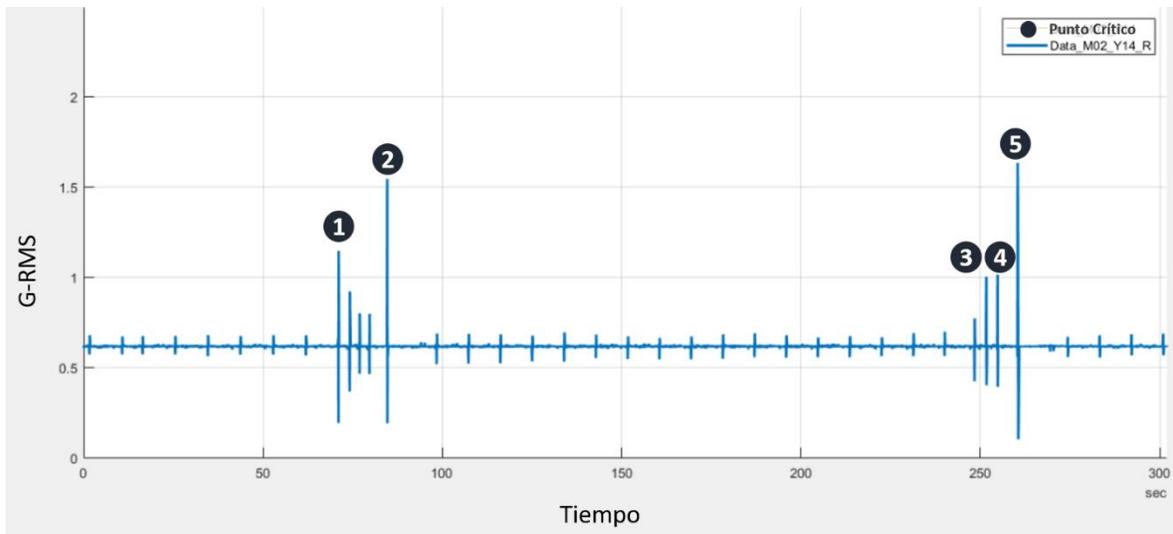


Figura 37. RE2. Reconstrucción de señal Y en la réplica 1 (cortador 1/4”).

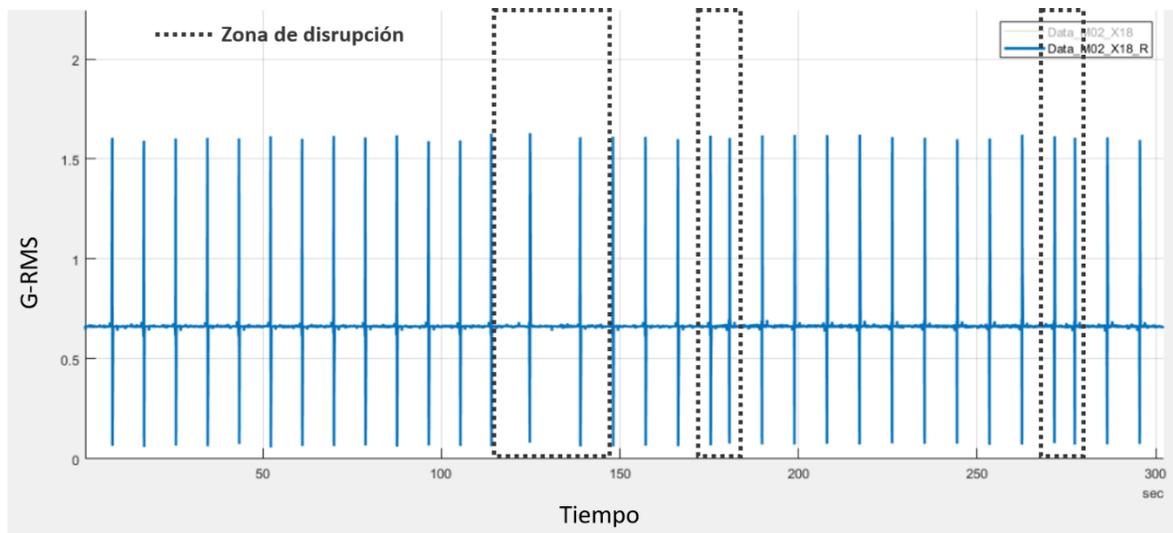


Figura 38. RE2. Reconstrucción de señal X en la réplica 2 (cortador 1/8”).

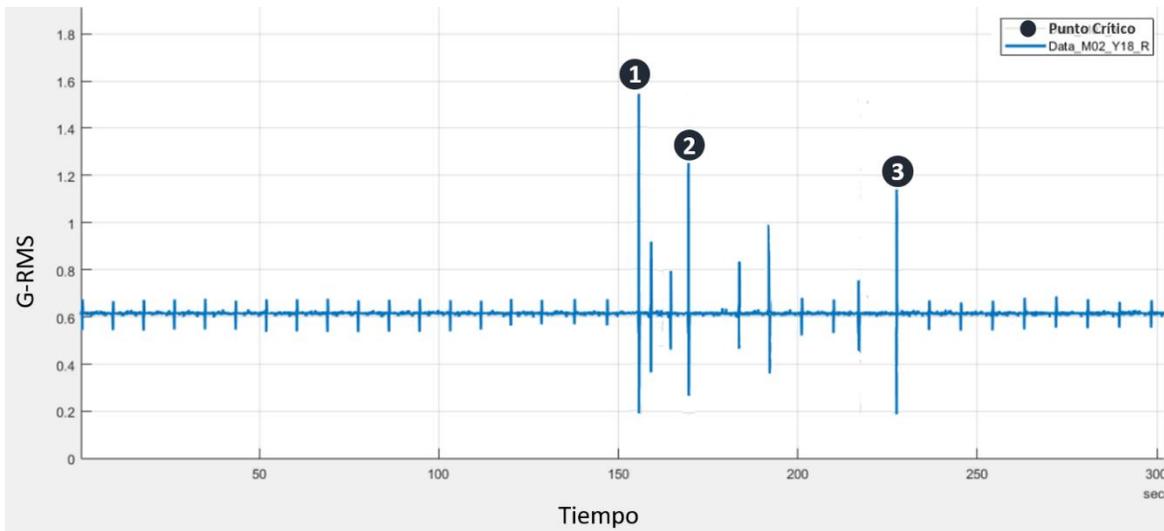


Figura 39. RE2. Reconstrucción de señal Y en la réplica 2 (cortador 1/8”).

Concluyendo con el análisis de las muestras experimentales, se muestra lo propio para la repetición tres (Fig. 40-43):

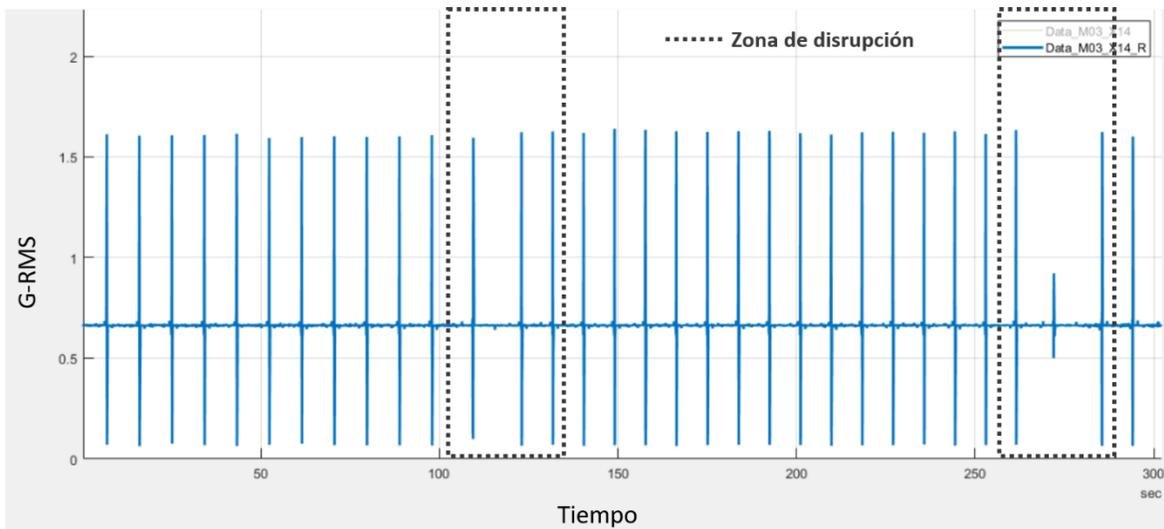


Figura 40. RE3. Reconstrucción de señal X en la réplica 1 (cortador 1/4”).

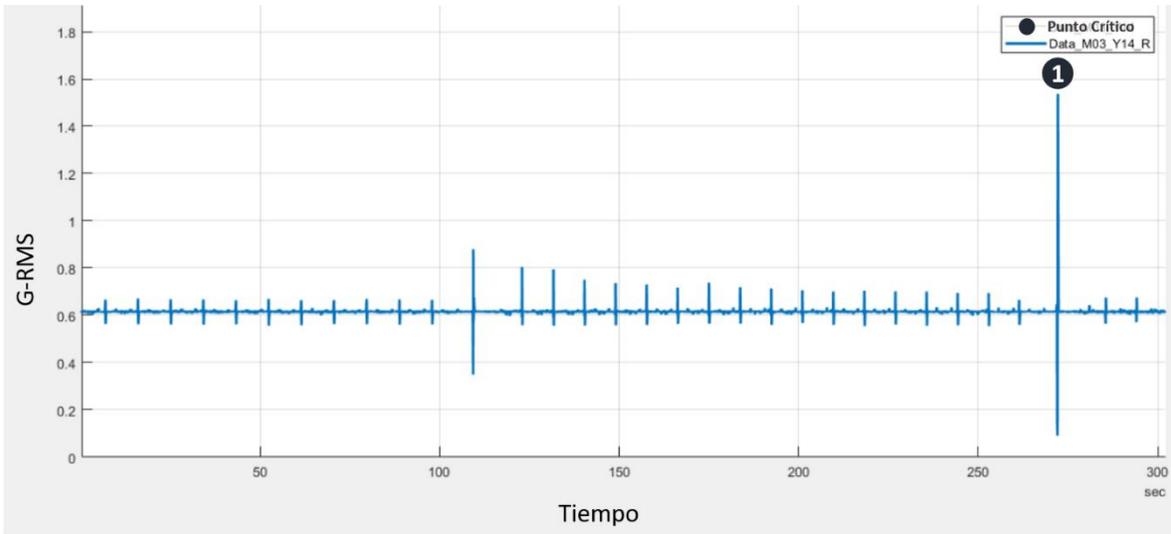


Figura 41. RE3. Reconstrucción de señal Y en la réplica 1 (cortador 1/4”).

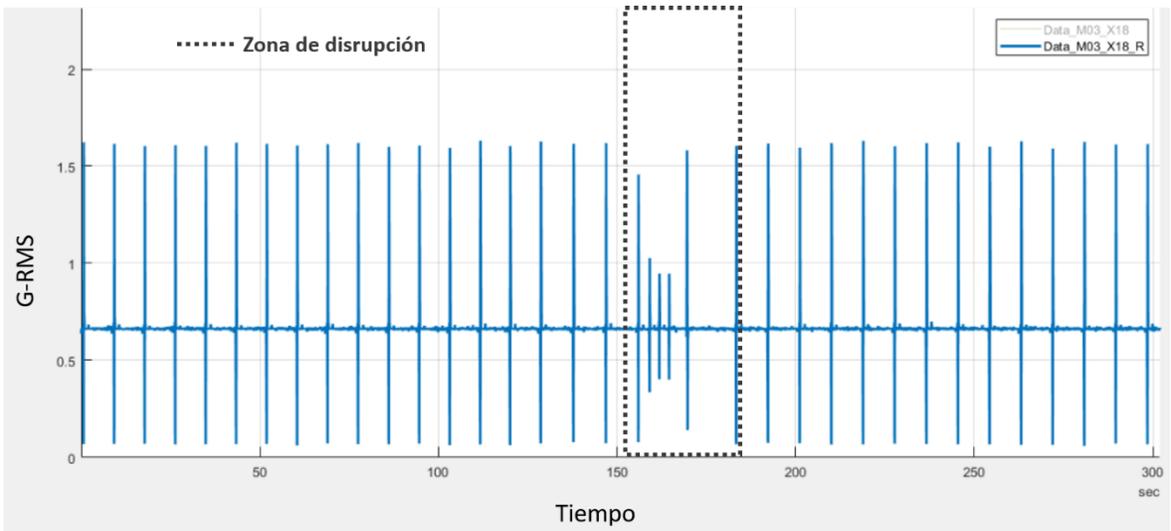


Figura 42. RE3. Reconstrucción de señal X en la réplica 2 (cortador 1/8”).

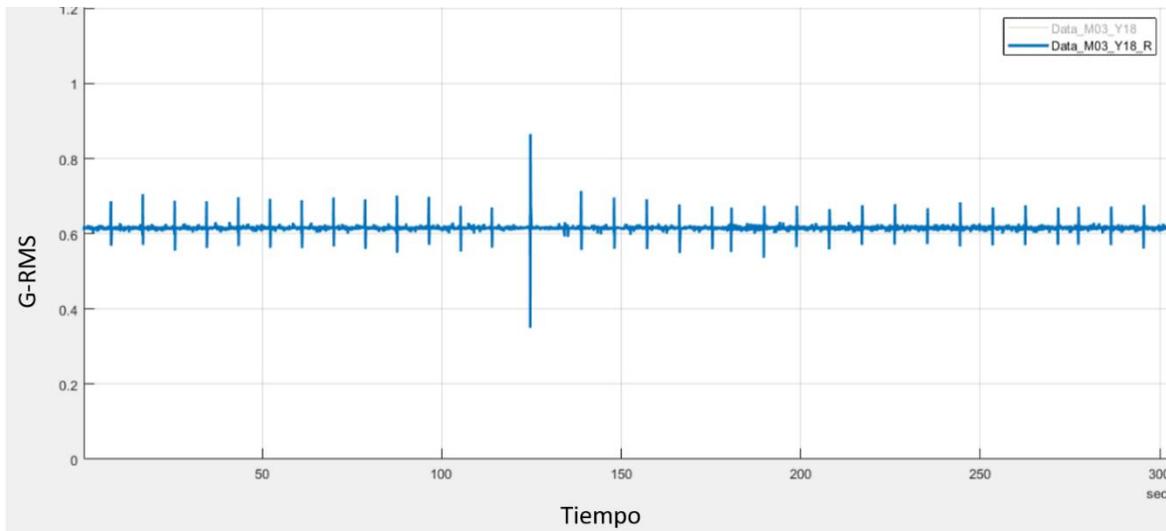


Figura 43. RE3. Reconstrucción de señal Y en la réplica 2 (cortador 1/8”).

Discusión de resultados

Las señales obtenidas muestran que entre el 10% y 62% del tiempo total de muestreo presenta características de chatter, ubicándose entre los primeros y últimos minutos de la operación de maquinado con frecuencias naturales que van de los 25 Hz a los 235 Hz (Tabla 6).

Tabla 6. Tiempos de inestabilidad.

Repetición	Inicio de inestabilidad [s]	Término de inestabilidad [s]	Frecuencia natural en Y [Hz]	% Tiempo de recurrencia
RE1 - Réplica 1	2.50	2.98	217.70	9.60
RE1 - Réplica 2	0.52	3.50	235.40	59.60
RE2 - Réplica 1	1.20	4.30	216.50	62.00
RE2 - Réplica 2	2.10	3.80	232.60	34.00
RE3 - Réplica 1	1.80	4.50	157.90	54.00
RE3 - Réplica 2	2.10	2.10	24.80	0.00

La tabla 7 muestra la relación de los parámetros con su inestabilidad a lo largo de las tres repeticiones. Evidenciando el porqué de las características de acabado superficial obtenido ya que, en comparación con la repetición uno (RE1) y dos (RE2) se observa que la repetición tres (RE3) presenta una clara disminución de los puntos críticos de inestabilidad y de su rugosidad, por lo que el efecto de energía de vibración también se ve disminuido.

Tabla 7. Relación de parámetros con puntos críticos de inestabilidad.

Repetición	Puntos críticos de inestabilidad	Profundidad de corte axial [mm]	Velocidad de alimentación $\left[\frac{mm}{min}\right]$	Velocidad del husillo [rpm]	Rugosidad Ra [μm]
RE1 - Réplica 1	2	1.00	500	3000	≥ 0.32
RE1 - Réplica 2	4				
RE2 - Réplica 1	5	0.50	550	3500	≥ 0.25
RE2 - Réplica 2	3				
RE3 - Réplica 1	1	0.25	600	4000	≥ 0.20
RE3 - Réplica 2	0				

De este modo, con la información recabada puede generarse el análisis que permite la obtención de los lóbulos de estabilidad para la ejecución del maquinado. Técnica mediante la cual la información puede adaptarse al *procesamiento avanzado de datos: en tiempo real y métodos de toma de decisiones* estudiado en la sección 3.1.

Con dicha herramienta, es posible identificar las áreas estables de acuerdo con los parámetros del proceso presentados inicialmente en la tabla 4 y de acuerdo con lo necesario para la obtención de la solución al modelo de fresado estudiado en la sección 2.3, para lo cual se proporciona la información de la tabla 8; dicha tabla muestra los parámetros modales necesarios para dar solución al modelo de vibraciones. La información mostrada ha sido determinada a partir de la información proporcionada por el fabricante y a través de los datos recabados de la descomposición de las señales en el espectro de frecuencia.

Tabla 8. Parámetros modales.

Repetición	Masa modal [m_m]	Amortiguamiento [ζ]	Fuerza de corte [K_{rc}]	Fuerza de corte [K_{tc}]	Ángulo de hélice [β]
RE1	3 [kg]	0.0086 [1]	240.20 [N/mm ²]	850.00 [N/mm ²]	30°
RE2	6 [kg]	0.0252 [1]	266.83 [N/mm ²]	881.44 [N/mm ²]	
RE3	9 [kg]	0.0418 [1]	293.46 [N/mm ²]	912.89 [N/mm ²]	

Así pues, dada la información recabada se realiza la obtención de los lóbulos de estabilidad a través de un Script en MATLAB® para la solución del modelo matemático de vibraciones estudiado en la sección 2.3:

$$m_x \ddot{x}(t) + c_x \dot{x}(t) + k_x x(t) = \sum_{j=1}^N F_{xj}(t)$$

$$m_y \ddot{y}(t) + c_y \dot{y}(t) + k_y y(t) = \sum_{j=1}^N F_{yj}(t)$$

Los lóbulos de estabilidad muestran la consistencia de las operaciones realizadas con respecto de la profundidad de corte seleccionada (a_p), así como, la velocidad del husillo (S). Dado que el modelo presenta ecuaciones diferenciales con retardo (DDEs), se realiza una aproximación numérica con la semidiscretización de Chebyshev para encontrar la convergencia de la estabilidad a través de vectores que se denotan en tono azul en los gráficos ya mencionados.

De esta manera, en la figura 44 se observa que dados los parámetros seleccionados para la realización de la operación: 3000 *rpm* y $a_p = 1 \text{ mm}$ en la repetición uno, la zona de estabilidad para el proceso es mínima. En consecuencia, se tienen condiciones altamente críticas de inestabilidad y, por ende, los resultados obtenidos en la pieza manufacturada mostraron características de rugosidad alta. Por lo que, las mejores condiciones de corte se encontraban entre las 3000-4000 *rpm* y a profundidades de corte axial (a_p) inferiores a los 0.25 mm (250 micras).

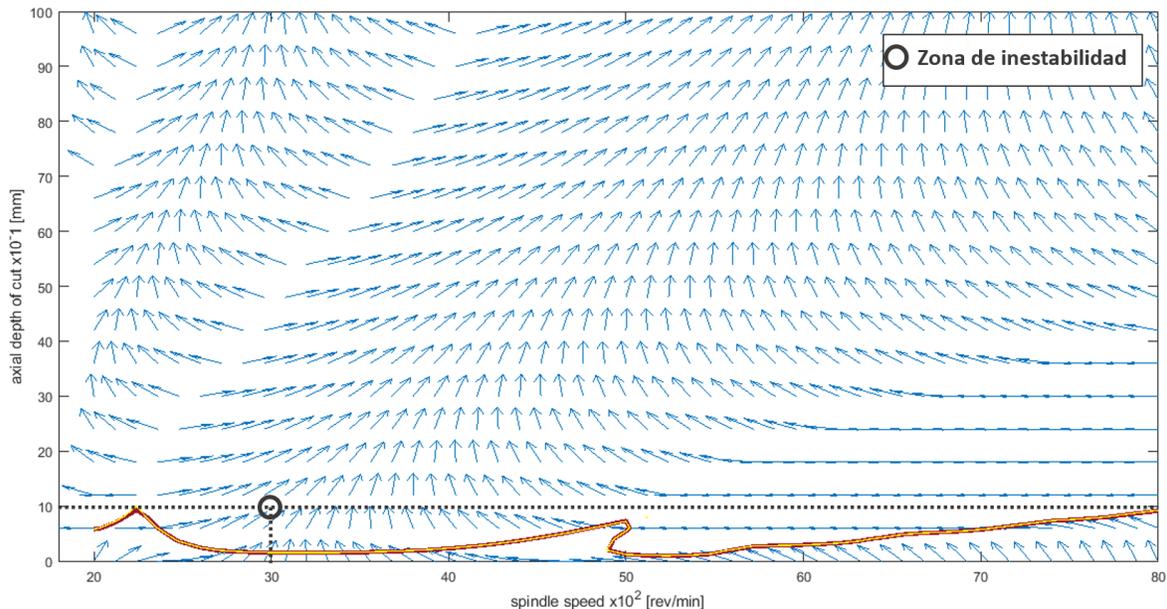


Figura 44. RE1. Estabilidad para el proceso con herramienta de 1/4" (rojo) y de 1/8" (amarillo).

En el caso de la segunda repetición (Fig. 45), la región estable se ve mejorada según los parámetros utilizados para la operación: 3500 *rpm* y $a_p = 0.5 \text{ mm}$. Sin embargo, la profundidad de corte se encuentra muy cerca de la frontera del lóbulo obtenido en los 0.5 mm. Por lo que, pese

a estar en contacto con dicha región las características de estabilidad tienen tendencia a volverse inestables a lo largo de las operaciones. Esto se comprueba al observar las señales reconstruidas en la réplica uno y dos, ya que la inestabilidad se presenta en periodos de tiempo distantes y con una tendencia rápida de recuperación.

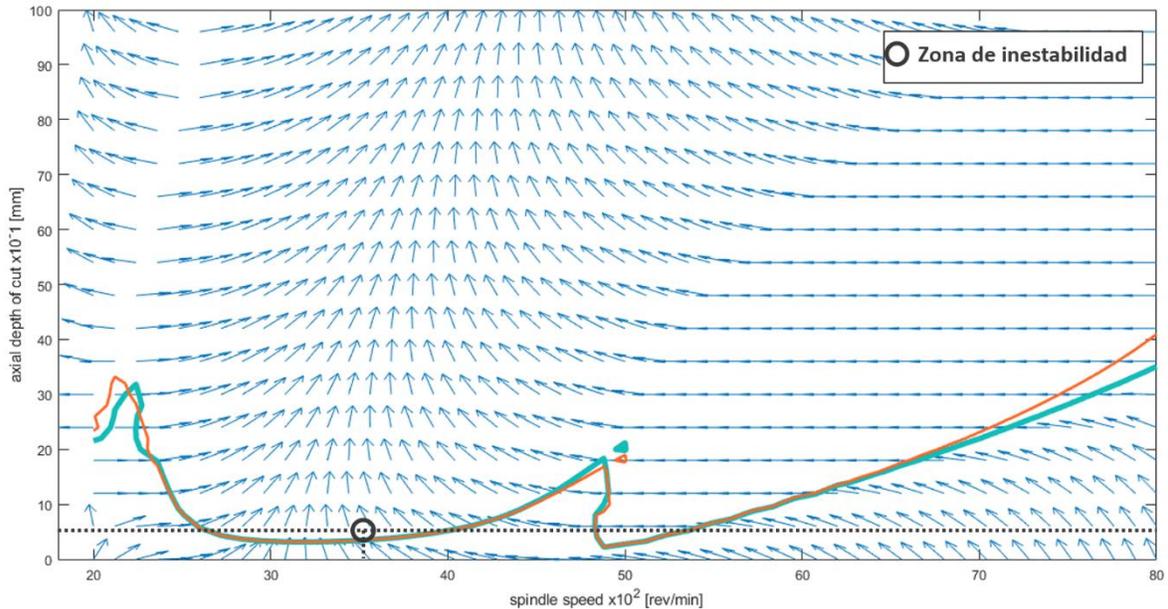


Figura 45. RE2. Estabilidad para el proceso con herramienta de 1/4" (verde agua) y de 1/8" (anaranjado).

Por último, la repetición tres (Fig.46) resulta ser el más estable dadas las condiciones del proceso de 4000 rpm y $a_p = 0.25$ mm. Ya que, la región de estabilidad se encuentra garantizada a partir de una profundidad axial de un milímetro. Incrementando el número de valores alcanzables para la obtención de un buen acabado de superficie.

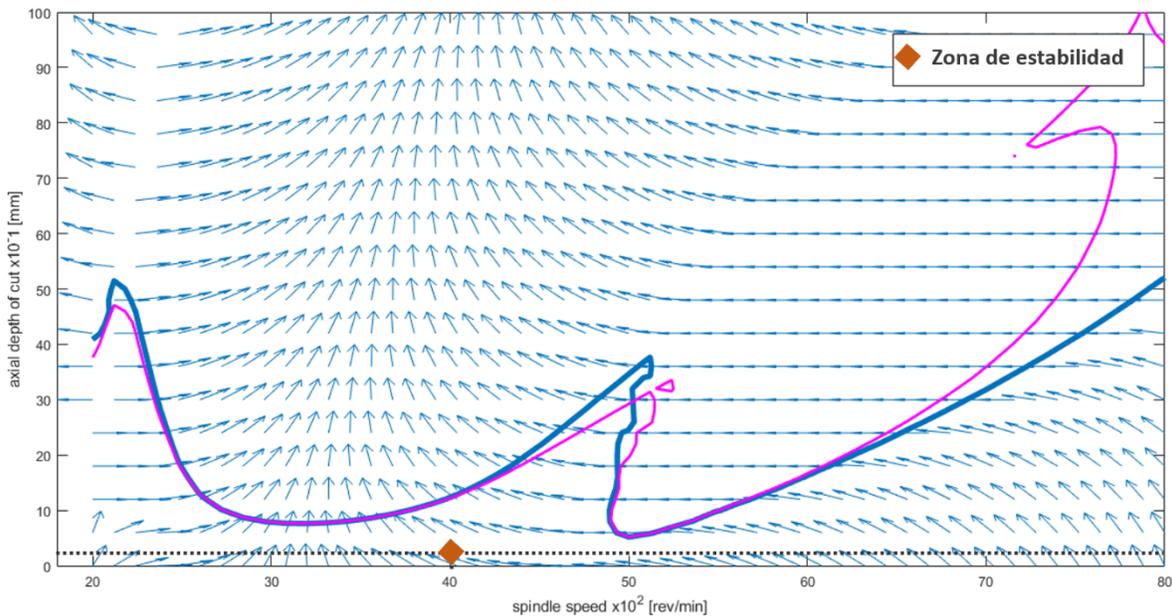


Figura 46. RE3. Estabilidad para el proceso con herramienta de 1/4" (azul) y de 1/8" (rosa).

Como puede observarse, sólo se tienen pequeñas desviaciones al inicio y fin de los gráficos y con tendencia hacia zonas de estabilidad crítica, pero siempre manteniendo niveles de profundidad axial y revoluciones por minuto prácticamente invariables. De igual forma la información observada muestra que las mejores condiciones para el proceso se obtendrán al utilizar velocidades que oscilen entre las 2500-4500 RPM y con profundidades de corte inferiores a un milímetro. De igual forma los gráficos obtenidos corroboran las características obtenidas durante el proceso de acabado de las piezas.

Recomendaciones

(7) Toda vez que se tiene la información de las características críticas de la vibración y las regiones de estabilidad para las operaciones, se propone la combinación de estas técnicas con la finalidad de generar una ventana de operación adecuada a las necesidades de un proceso en particular. De manera que con base en los parámetros proporcionados por el fabricante de las herramientas se logre determinar una ventana más amplia, que podría brindar mejores recomendaciones para las características de acabado superficial y sustentabilidad de las operaciones. Generando así, las características de geometría y apariencia deseadas en el menor número de operaciones posibles y, por ende, proporcionar información objetiva y con certidumbre.

Al realizar la combinación de las características anteriormente mostradas, se obtienen las ventanas de estabilidad para las repeticiones estudiadas:

Repetición uno (Fig. 47), se aprecia del lado izquierdo el lóbulo de estabilidad correspondiente a la operación, así como, la tendencia hacia la región más estable a través de la convergencia de los vectores de Chebyshev. Con lo que puede establecerse la sección con las mejores características de acabado superficial entre 0-0.25 mm de profundidad de corte axial y 2500-3750 rpm. Por otra parte, del lado derecho se muestran las zonas de estabilidad, dónde la zona roja muestra que cerca del 66% de la profundidad de corte axial presentará condiciones críticas de estabilidad sin importar la velocidad del husillo que se utilice.

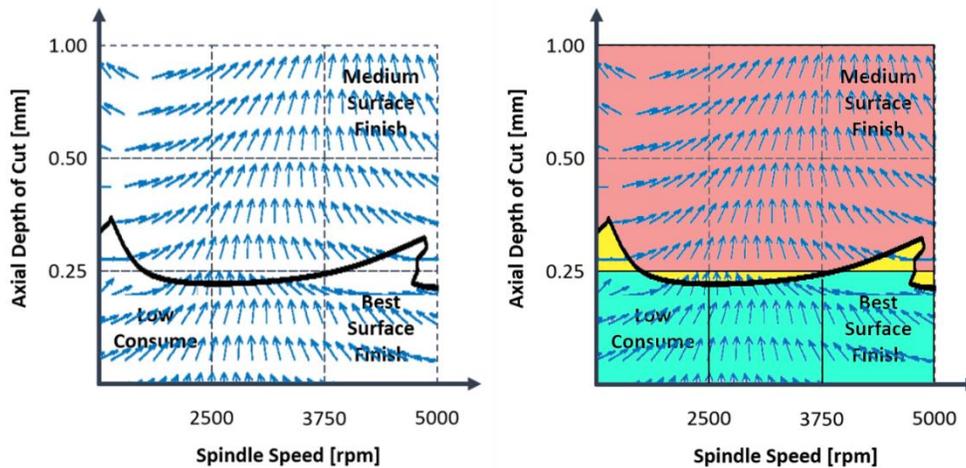


Figura 47. Representación de ventana de operación para la repetición uno.

Para la repetición dos (Fig. 48), se muestra el lóbulo de estabilidad mostrando que el 66.6% de la profundidad de corte axial puede obtener características de acabado superficial bueno. La convergencia de los vectores establece la zona con mejores características de acabado entre 0-0.50 mm de profundidad de corte axial y 1250-4375 rpm.

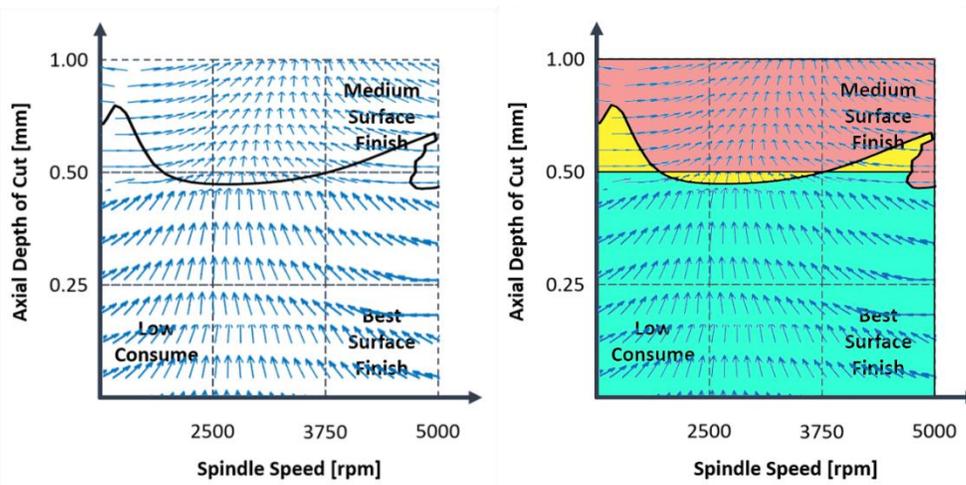


Figura 48. Representación de ventana de operación para la repetición dos.

Por último, en el caso de la repetición tres (Fig. 49), el lóbulo de estabilidad obtenido evidencia que cerca del 83.25% de la profundidad de corte axial proveerá de buenas condiciones para la obtención del acabado superficial deseado. La convergencia establece la sección de la ventana entre 0-0.75 mm de profundidad de corte axial y 0-5000 rpm, siendo así, la región más amplia para la obtención de las mejores características de acabado superficial.

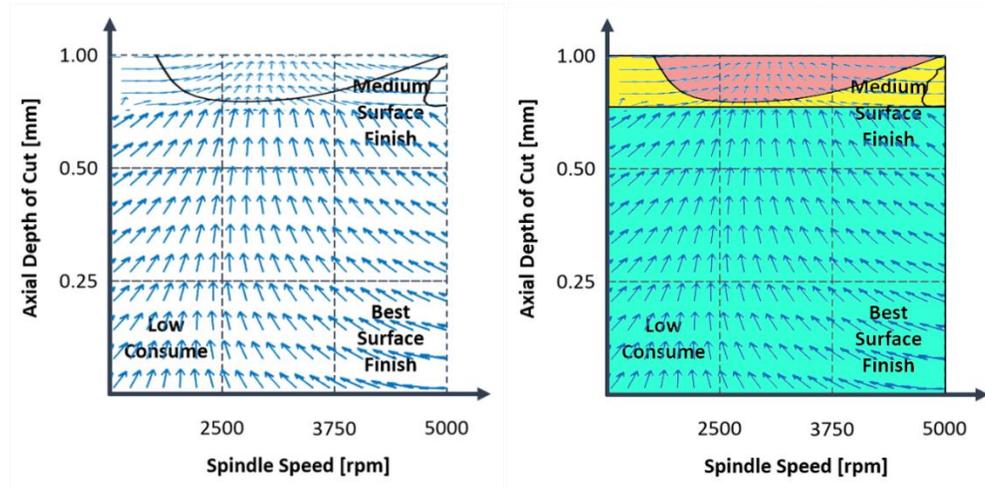


Figura 49. Representación de ventana de operación para la repetición tres.

Así pues, gracias a la obtención de las ventanas de operación propuestas, se confirma la hipótesis de que el efecto de chatter en las operaciones de fresado CNC es determinado por la relación entre la profundidad de corte y la velocidad del husillo y es posible predecir su estabilidad (H_1). Contar con la ventana de estabilidad para las operaciones se convierte entonces en una herramienta útil que garantizará las mejores condiciones para la obtención del acabado superficial deseado en piezas características de la industria metalmecánica enfocadas al sector automotriz y aeroespacial. De igual forma, contribuye a contar con un instrumento visual que de forma sencilla y clara permita identificar las zonas en las que se tendrán zonas de chatter y así poder evitarlas.

En suma, también se identifican las regiones en que puede obtenerse un acabado de superficie que garantice los requerimientos técnicos de las piezas sin necesidad de hacer uso de probetas, así como, las regiones en que esta calidad puede verse empobrecida. De este modo, con la información establecida puede tomarse un curso de acción adecuado para el manejo de las operaciones del proceso.

Conclusiones

Se logró identificar y acotar la influencia de los parámetros de corte, profundidad axial y velocidad del husillo en la generación de chatter durante operaciones de fresado por CNC. Esto en superficies libres empleadas en la fabricación de moldes prototipo para la inyección de plástico en los sectores automotriz o aeroespacial. Para los casos de estudio presentados se encontró que el efecto de chatter se da entre el 10% y 62% del tiempo total de muestreo y que este se ubica entre los primeros y últimos minutos de la operación de maquinado, sin embargo, esto no garantizó la obtención del acabado superficial requerido.

A partir de la correlación de la información de las señales en el espectro de frecuencia y los lóbulos de estabilidad, se logró establecer un conjunto de ventanas de procesamiento que predicen el acabado superficial y acotan las zonas de chatter. A través, de un campo de vectores que acorde a su convergencia permite definir las regiones de mayor estabilidad de acuerdo a su posición dentro de las secciones de la ventana. Permitiendo así, identificar y establecer los sectores con las mejores condiciones de estabilidad y las zonas de mejor acabado superficial.

La combinación de técnicas propuesta permite ser implantada en la pequeña y mediana industria de la manufactura a un bajo costo en la infraestructura, y sin la necesidad de grandes inversiones. Ya que sólo se requiere de un sensor inercial y un martillo de impacto; para la industria 4.0 la ventaja radica en la producción continua y la disminución del consumo de energía. Lo que garantiza la toma de decisiones adecuada para el control de las operaciones antes o durante la ejecución del proceso de manufactura de las piezas.

Así pues, como líneas futuras de investigación se considera:

- Realizar más casos de estudio que permitan verificar la eficacia de las ventanas de operación.
- Estudiar los efectos de vibración que pudieran presentarse en la orientación del eje Z.

Para finalizar, de manera general el desarrollo de este trabajo fue sumamente enriquecedor tanto en lo académico como en lo profesional. En lo académico permitió ampliar el panorama sobre el enfoque tradicional en que se estudia al fenómeno de chatter, estableciendo un análisis directo sobre las piezas finales de trabajo y no en elementos controlados como las probetas de manufactura. Y, en lo profesional mejoró mis habilidades para la investigación, y contribuyó al fortalecimiento de mis conocimientos técnicos y científicos en ingeniería mecánica y mecatrónica.

Referencias

- Ahmadi, K., & Altintas, Y. (2014). Identification of machining process damping using output-only modal analysis. *ASME Journal of Manufacturing Science & Engineering*.
- Altintas, Y. (2012). *Manufacturing Automation: Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations, and CNC Design*. United States of America: Cambridge University Press.
- Altintas, Y., & Aslan, D. (2017). Integration of virtual and on-line machining process control and monitoring. *Manufacturing Technology*, 349-352.
- Balachandran, B., & Magrab, E. (2009). *Vibrations*. Cengage Learning.
- Banco Mundial. (25 de Abril de 2019). *Banco Mundial*. Obtenido de <https://datos.bancomundial.org/pais/mexico>
- Barrera Franco, A., & Pulido Morán, A. (2016). *The mexican automotive industry: current situation, challenges and opportunities*. México: ProMéxico.
- Beudaert, X., Lavernhe, S., & Tournier, C. (2014). Direct trajectory interpolation on the surface using an open CNC. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 535-546.
- Caixu, Y., & et al. (2019). A review of chatter vibration research in milling. *Chinese Journal of Aeronautics*, 215-242.
- Cao, H., Zhang, X., & Chen, X. (2017). The concept and progress of intelligent spindles: a review. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 21-52.
- Cordes, M., Hintze, W., & Altintas, Y. (2019). Chatter stability in robotic milling. *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, 11-18.
- Coromant, S. (2020). *Sandvik Coromant Tool Guide*. Obtenido de <https://www.sandvik.coromant.com/en-gb/products/pages/toolguide.aspx>
- Coromant, S. (2020). *Tool Guide*. Obtenido de <https://www.sandvik.coromant.com/en-gb/products/pages/toolguide.aspx>
- De la Mora, L. M. (2019). El comercio exterior como palanca del crecimiento económico y desarrollo de México. *Comercio Exterior Bancomext*.
- Denis, A., & Altintas, Y. (2018). On-line chatter detection in milling using drive motor current commands extracted from CNC. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 64-80.
- Dunaj, P., Berczynsky, S., & Dolata, M. (2019). Modelling machine tool rocking vibrations using reduced order models. *Advances in materials, mechanics and manufacturing*, 183-190.
- Dunaj, P., Marchelek, K., & Chodźko, M. (2019). Application of the finite element method in the milling process stability diagnosis. *The Journal of Applied Mechanics*, 353-367.
- Dziak, M. (1 de Junio de 2020). Technology. Salem Press Encyclopedia of Science. Obtenido de <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=ers&AN=89145578&lang=es&site=eds-live>
- Eksioglu, C., Kilic, Z., & Altintas, Y. (2012). Discrete-Time Prediction of Chatter Stability, Cutting Forces, and Surface Location Errors in Flexible Milling Systems. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 134.
- Faassen, R. (2007). Chatter prediction and control for high-speed milling modelling and experiments. *Technische Universiteit Eindhoven*, 6.
- Fritz, K. (2011). *Manufacturing Processes*. Berlin: Springer.
- García Plaza, E., Núñez López, P., & Beamud González, E. (2019). Efficiency of vibration signal feature extraction for surface finish monitoring in CNC machining. *Journal of Manufacturing Processes*, 145-157.
- Groover, M. P. (2014). *Introduction to Manufacturing Processes*. U.S.: John Wiley & Sons.

- Hamrol, A., & et al. (2018). Advances in manufacturing. International Scientific-Technical Conference. (págs. 3-11). Poland: Springer.
- Iglesias, A., Munoa, J., & Ciurana, J. (2014). Optimisation of face milling operations with structural chatter using a stability model based process planning methodology. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 559-571.
- INEGI. (18 de Noviembre de 2020). *Instituto Nacional de Estadística y Geografía*. Obtenido de <http://cuentame.inegi.org.mx/economia/secundario/manufacturera/default.aspx?tema=E>
- Insperger, T., & Stépán, G. (2000). Stability of the milling process. *Polytechnica Mechanical Engineering*, 47-57.
- Insperger, T., & Stépán, G. (2011). Semi-discretization for time delay systems. *Applied Mathematical Sciences*, 178.
- Iturgaiz Ibañez, A., Jose Arrazola, P., & Bonde Ørskov, K. (2020). Workpiece Material Influence on Stability Lobe Diagram. *Procedia Manufacturing*, 479-486.
- Jasiewicz, M., & Mia, dlicki, K. (2019). Implementation of an Algorithm to Prevent Chatter Vibration in a CNC System. *Materials*.
- Khasawneh, F., & Munch, E. (2016). Chatter detection in turning using persistent homology. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 27-41.
- Klein, R. (2017). Comparison of methods for separating vibration sources in rotating machinery. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 97, 20-32.
- Koike, R., Ohnishi, K., & Aoyama, T. (2016). A sensorless approach for tool fracture detection in milling by integrating multi-axial servo information. *Manufacturing Technology*, 385-388.
- Kumar, K., & et al. (2018). Advanced Machining and Manufacturing Process. *Materials Forming, Machining and Tribology*, 20-25.
- Lauro, C., Brandão, L., & Ribeiro Filho, S. (2015). Quality in the machining: characteristics and techniques to obtain good results . *Manufacturing Engineering*, 51-75.
- Luna Contreras, A., & Yañez Valdez, R. (2017). Modelado de fuerzas de corte del proceso de fresado. *Posgrado en Ingeniería Mecánica, UNAM*, 1-5.
- Mia, M., Królczyk, G., & et al. (2019). Intelligent optimization of hard-turning parameters using evolutionary algorithms for smart manufacturing. *Materials*.
- Mohammadi, Y., & Ahmadi, K. (2019). Frequency domain analysis of regenerative chatter in machine tools with Linear Time Periodic dynamics. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 378-391.
- Mokhtari, A., Mahdi Jalili, M., & et al. (2019). Size dependent vibration analysis of micro-milling operations with process damping and structural nonlinearities. *European Journal of Mechanics*, 57-69.
- Monnin, J., Kuster, F., & Wegener, K. (2014). Optimal control for chatter mitigation in milling part 2: experimental validation. *Control Engineering Practice*, 167-175.
- Mori, Y. (2017). *Mechanical Vibrations: Applications to Equipment*. Great Britain: John Wiley & Sons.
- Munoa, J., Beudaert, X., & et al. (2016). Chatter suppression techniques in metal cutting. *Manufacturing Technology*, 785-808.
- Nieslony, P., Krolczyk, G., & et al. (2018). Surface quality and topographic inspection of variable compliance part after precise turning. *Applied Surface Science*, 91-101.
- Ortiz Prado, A., & et al. (2013). *Modelado de procesos de manufactura*. México: UNAM-FI.
- Paliwal, V., & Ramesh Babu, N. (2020). Prediction of Stability Lobe Diagrams in High-Speed Milling by Operational Modal Analysis. *Procedia Manufacturing*, 283-293.
- Qin, C., Tao, J., & et al. (2020). A novel Chebyshev-wavelet-based approach for accurate and fast prediction of milling stability. *Precision Engineering*, 244-255.

- Quintana, G., & Ciurana, J. (2011). Chatter in machining processes: a review. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 363-376.
- Quintana, G., Ciurana, J., & Teixidor, D. (2008). A new experimental methodology for identification of stability lobes diagram in milling operations. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 1637–1645.
- Ramírez Jerónimo, L. F. (2017). *Modelado y análisis de vibraciones en el proceso de fresado*. Tesis de grado, Universidad Autónoma del Estado de México, Estado de México.
- Rao, S. S. (2017). *Mechanical Vibrations*. Miami: Prentice Hall.
- Ratnam, C. (2016). Process monitoring and effects of process parameters on responses in turn-milling operations based on SN ratio and ANOVA. *Measurement*, 221-232.
- Reynolds, E. (2017). Innovation and Production: Advanced Manufacturing Technologies, Trends and Implications for US Cities and Regions. *Built Environment*, 43(1), 25-43.
- Sandoval Rios, M., & et al. (2016). *Crafting the future a roadmap for industry 4.0 in Mexico*. México: Secretaría de Economía.
- SE, S. d. (23 de Marzo de 2020). *gob.mx*. Obtenido de Industria y Comercio | Instrumentos de comercio exterior: <https://www.gob.mx/se/acciones-y-programas/industria-y-comercio-instrumentos-de-comercio-exterior?state=published>
- Sivasakthivel, P., Velmurugan, V., & Sudhakaran, R. (2011). Prediction of vibration amplitude from machining parameters by responde surface methodology in end milling. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 453–461.
- Soladana Aguilar, R., & Ortega Macias, T. (2018). Estudio de factores críticos y consumo energético para acero 1045 en maquinado CNC. (*Tesis de licenciatura*). UNAM, Facultad de Ingeniería, Ciudad de México.
- Swift, K., & Booker, J. (2013). *Manufacturing Process Selection Handbook*. Oxford, United Kingdom: Butterworth-Heinemann.
- Tempelman, E., & et al. (2014). *Manufacturing and design*. Great Britain: Butterworth-Heinemann.
- Tustly, J., & Tobias, S. (1958). Theory of regenerative machine tool chatter. *Engineering*, 258.
- Uhlmann, E., Abackerli, A., & et al. (2014). Simulation and analysis of error impact on freeform surface milling. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 607-620.
- Vargas Henríquez, L., & et al. (Enero-Junio de 2014). Development of predictive model for surface quality in turning process for high strength steels. *Prospect*, 12(1), 55-63.
- Vikram, K., & et al. (2016). Vibration diagnosis and prognostics of turn-milling operations using HSS and carbide end mill cutters. *3rd International Conference on Innovations in Automation and Mechatronics Engineering*, (págs. 217-224).
- Wan, S., Jin, X., & et al. (2019). Effect of vibration assistance on chatter stability in milling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 1-11.
- Zatarain, M., & et al. (2006). Analysis of the influence of mill helix angle on chatter stability. *Manufacturing Technology*, 365-368.
- Zhu, L., & Liu, C. (2020). Recent progress of chatter prediction, detection and suppression in milling. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2-17.
- Zimmer, S. (1 de junio de 2020). Manufacturing. Salem Press Encyclopedia. Obtenido de <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=ers&AN=89407060&lang=es&site=eds-live>