Instituto Politécnico Nacional

Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada Unidad Querétaro

Posgrado en Tecnología Avanzada

MEDICIÓN DEL DESGASTE DE UNA HERRAMIENTA DE CORTE UTILIZANDO UN SENSOR LÁSER DE DESPLAZAMIENTO

TESIS QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN TECNOLOGÍA AVANZADA

P R E S E N T A
Ing. Jaime de Jesús Reséndiz Pérez

Director de Tesis
Dr. Eduardo Castillo Castañeda

Santiago de Querétaro, Qro. Diciembre 2011.

SIP-14

INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de Querétaro siendo las 12 horas del día 27 del mes de Octubre del 2011 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis, designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de CICATA-IPN unidad Querétaro

para examinar la tesis titulada:

Medición del desgaste de una Herramienta de Corte utilizando un Sensor Láser de Desplazamiento

Presentada por el alumno:

Reséndiz	Pérez	Jaime de Jesús
Apellido paterno	Apellido materno	Nombre(s)

Con registro: B 0 9 1 6 4 0

aspirante de:

Maestría en Tecnología Avanzada

Después de intercambiar opiniones, los miembros de la Comisión manifestaron ***APROBAR LA TESIS***, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISIÓN REVISORA

Director de tesis

Dr. Eduardo Castillo Castañeda

Dr. Jorge Adalberto Huerta Ruelas

Dr. Juan Bautistá Hurtado Ramos

Dr. Víctor Martínez Fuentes

M.C. Maximiano Francisco Ruiz Torres

PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES

Dr. Jorge Adalberto Huerta Ruelas

INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIA APLICADA Y TECNOLOGÍA AVANZADA
UNIDAD QUERÉTARO

INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

CARTA CESIÓN DE DERECHOS

En la Ciudad de Querétaro, Qro el día 29 del mes Noviembre del año 2011, el (la) que suscribe Jaime de Jesús Reséndiz Pérez alumno (a) del Programa de Maestría en Tecnología Avanzada con número de registro B091640, adscrito a CICATA-IPN unidad Querétaro, manifiesta que es autor (a) intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección de Dr. Eduardo Castillo Castañeda y cede los derechos del trabajo intitulado Medición del Desgaste de una Herramienta de Corte Utilizando un Sensor Láser de Desplazamiento, al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección CICATA-IPN, Cerro Blanco No. 141 Colinas del Cimatario 76090 Querétaro, Qro. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

Ing. Jaime de Jesús Reséndiz Pérez
Nombre y firma

Índice de contenido

Índice de figuras y tablas……6
Resumen……8
Abstract……9
Capitulo 1. Introducción general……10
1.1 Antecedentes……10
1.2 Objetivos……11
1.2.1 Objetivo general……11
1.2.2 Objetivos específicos……11
1.3 Alcances y limitaciones……11
1.4 Justificación……12
1.5 Estructura de la tesis……12
Capitulo 2. Marco teórico……13
2.1 Proceso de mecanizado……13
2.1.1 Elementos de un proceso de mecanizado convencional……13
2.1.1.1 Pieza……14
2.1.1.2. Herramienta……14
2.1.1.3. Máquina herramienta……15
2.1.1.4. Sistema de control……15
2.2. Material de piezas mecanizadas……15
2.3. Material de herramientas de corte……17
2.3.1. Aceros rápidos……17
2.3.2. Carburos metálicos……18
2.3.3. Materiales cerámicos……18
2.3.4. Materiales diamantados……18
2.4. Procesos de corte……18
2.5. Duración y desgaste de la herramienta……20
2.5.1 Desgaste de la herramienta……20
2.5.2 Criterios de duración de una herramienta……22
2.5.3 Criterios para reemplazar una herramienta……22
2.6 Monitoreo de la herramienta de corte……23
2.7 Desarrollo de los métodos de monitoreo……25
2.7.1 Sistema Láser de Reflexión de Haz Único……26
2.7.2. Sistema de Monitorizado de Tensión Herramienta-Pieza……26
2.7.3. Sistema Láser Off-line……27

Capitulo 3 Sensor laser de desplazamiento……...29
3.1. Funcionamiento……...29
3.2. Principio de medición……..30
3.3. Características del sensor……..31
3.4. Fuentes de error……..34
3.4.1 Variación provocada por el montaje……..36
3.4.2 Reducción de las fluctuaciones de medición……..…38
3.4.2.1 Componentes de variacion del sistema de medicion……..38
3.4.2.1.1 Numero de promedios……...39
3.4.2.1.2 Diferencia de la distancia de referencia……39
3.4.2.1.3. Cantidad de luz recibida……..39
3.4.2.1.4. Influencia de las fluctuaciones del aire……40
3.4.2.2 Componentes diminutos de vibración en el sistema de medición……41
3.4.2.3. Resolución de entrada/salida……..…42
3.4.2.4 Aberraciones ópticas que afectan al sensor laser de desplazamiento……..…42
3.4.2.5 Medidas contra la influencia de las aberraciones……44
3.4.3. Reflexión lumínica y precisión en la medición……44
3.4.4. Precisión de la medición según las condiciones de la superficie del objeto……..45
Capitulo 4. Resultados……...47
4.1. Descripción de la base experimental……...47
4.2. Validación……..……51
4.3. Características de los insertos de la herramienta de corte……...55
4.4. Resultados obtenidos sin ningún inserto en la herramienta……55
4.5. Resultados obtenidos con 2 insertos nuevos……....59
4.6. Resultados obtenidos con un inserto nuevo y otro desgastado……..…62
4.7. Discusión y trabajos futuros……..……66
Capitulo 5 Conclusiones……71
Referencias……..73
Anexos……..76
Diagrama de conexión eléctrico……76
Definiciones de los conectores para el adaptador SSA-485……...76
Definiciones de los conectores para la PIC-STEP……77
Definiciones de los conectores del PIC……...78
Artículo CERMA……..80

Índice de figuras y tablas

Figura 1. Diferentes tipos de herramientas de corte……..14
Figura 2. Valores usuales de dureza y velocidad de corte ……16
Figura 3. Procesos de torneado y fresado……19
Figura 4. Períodos de desgaste en la vida de una herramienta……21
Figura 5. Desgaste en la cara y el flanco de una herramienta……..21
Figura 6. Partes de una herramienta desgastada [ISO/TC 29/1NG 22.2]……22
Figura 7. Sistema Láser de Reflexión de Haz Único……26
Figura 8. Sistema de Monitorizado de Tensión Herramienta-Pieza……..27
Figura 9. Esquema de las operaciones del sistema Laser Off-line (SLO)……28
Figura 10. Funcionamiento sensor láser de desplazamiento……..29
Figura 11. Principio de medición……..30
Figura 12. Características del sensor……..31
Figura 13 Diferencia en la salida entre un CCD normal y un Li-CCD……32
Figura 14 Vista frontal y trasera del controlador……...33
Figura 15 Funcionamiento de un PSD y un CCD……..34
Figura 16 Desviación producida por fallas en el adhesivo……36
Figura 17 Expansión térmica en el soporte……37
Figura 18 Eliminando la variación mecánica……..38
Figura 19 Elementos que determinan la resolucion estatica……39
Figura 20 Resolución estática en la distancia de referencia.....39
Figura 21 Influencia de fluctuaciones del aire……..40
Figura 22 Purga de aire……..41
Figura 23 Lente ideal sin aberración.....43
Figura 24 Aberraciones que afectan a los sensores laser de desplazamiento……43
Figura 25 Sistemas de lentes para suprimir las aberraciones……44
Figura 26 Reflexion luminica……..45
Figura 27 Posicionamiento para medir objetos con reflexión especular.....46
Figura 28 Arreglo Experimental……48
Figura 29 Secuencia de pasos para obtener las mediciones y gráficas……49
Figura 30 Gráfica sin puntos agregados……50
Figura 31 Gráfica con puntos agregados……..51
Figura 32 Gráfica de la punta de los insertos con puntos agregados……51

Figura 33 Parte cilíndrica de la herramienta de corte……52
Figura 34 Nube de puntos obtenida utilizando el Volumix E3D-101048……53
Figura 35 Contorno de la herramienta, obtenido mediante Volumix E3D-1010.49……..54
Figura 36 Gráfica en polares de la parte cilíndrica de la herramienta, obtenida mediante el sensor láser de desplazamiento……...54
Figura 37 Medidas de los insertos de carburo utilizados en estas pruebas……..55
Figura 38 Geometría de la herramienta de corte sin ningún inserto……...56
Figura 39 Ventana del programa en Visual Basic para la adquisición de datos……...57
Figura 40 Gráficas en polares de la herramienta sin ningún inserto……58
Figura 41 Nube de puntos en 3D de la herramienta de corte sin insertos……...58
Figura 42 Perfil obtenido en Geomagic a partir de la nube de puntos……59
Figura 43 Geometría de la herramienta de corte con 2 insertos nuevos……...60
Figura 44 Gráficas en coordenadas de la herramienta con dos insertos nuevos……61
Figura 45 Nube de puntos en 3D donde se aprecia el filo de los 2 insertos nuevos…...61
Figura 46 Perfil obtenido en Geomagic donde se observan los 2 insertos nuevos en la herramienta……....62
Figura 47 Geometría de la herramienta con un inserto nuevo y otro desgastado……62
Figura 48 Gráficas en polares que muestran un inserto nuevo y otro desgastado……..63
Figura 49 Nube de puntos en 3D para un inserto nuevo y otro desgastado……64
Figura 50 Perfil obtenido en Geomagic donde se observa un inserto desgastado……..64
Figura 51 Gráfica que muestra los resultados de las mediciones de distancia en el inserto sin desgaste y a su vez los resultados del inserto desgastado…….....65
Figura 52 Montaje del sensor láser en un taladro fresador……..67
Figura 53 Arreglo experimental utilizando un mototool……68
Figura 54 Desgaste medido con un Vernier……69
Figura 55 Caras de los insertos……70
Tabla 1 Valores correspondientes al inserto que fue desgastado (antes y después de sufrir el desgaste)……..66
Tabla 2 Valores obtenidos con el sensor láser correspondientes al inserto que fue desgastado en zona z=10.5……..70

Resumen

El monitoreo del desgaste y fractura juega un papel importante en la predicción de la vida útil de la herramienta de corte, esto ha sido estudiado por muchos investigadores por un largo periodo de tiempo, ya que el tiempo de vida de la herramienta de corte es un factor económico muy importante en el maquinado de metales.

Por lo cual cualquier mejora en la herramienta o en el material de trabajo que aumente la duración de la herramienta es benéfica.

En este trabajo se presenta una forma de determinar el desgaste de una herramienta de corte de tres filos la cual se utiliza comúnmente en operaciones de fresado.

El desgaste sufrido por la herramienta de corte es estimado directamente utilizando un sensor laser de desplazamiento, con características de alta resolución y sensibilidad. El sensor mide la distancia entre la salida del haz de luz y la herramienta, utilizando el principio de triangulación.

Para llevar a cabo las mediciones se diseño un dispositivo que hiciera girar a la herramienta de corte mientras el sensor escaneaba una parte de los insertos, los datos obtenidos son utilizados para generar gráficas en coordenadas polares, las cuales ayudan a visualizar la condición de la herramienta, después de escanear una parte el sensor es desplazado a otro punto en el eje vertical para llevar a cabo la misma operación de escaneo, finalmente con todos los datos recabados se realiza una nube de puntos en 3D y se procede a comparar los valores obtenidos de las mediciones en cada uno de los puntos antes y después del desgaste.

Esta técnica permite cuantificar el desgaste de la herramienta con una exactitud y precisión menor a un micrómetro, mientras la herramienta se encuentra rotando.

Abstract

Wear and fracture monitoring plays an important role in predicting the life time of the cutting tool, this has been studied by many researchers for a long period of time.

The wear of the cutting tool is a very important economic factor in the cutting of metals, so any improvement in the tool or work material that increases the tool life is beneficial.

This paper presents a way to determine the wear of a cutting tool with three edges which is commonly used in milling operations.

The wear suffered by the cutting tool is estimated directly using a laser displacement with characteristics of high resolution and sensitivity. The sensor measures the distance between the output of the light beam and the tool, using the principle of triangulation.

In order to carry out the measurements was designed a device to make turn the cutting tool while the sensor scanned a portion of the inserts, data obtained are used to generate graphs in polar coordinates, which help to visualize the condition of the tool, after scanning a part the sensor is moved to another point on the vertical axis to perform the same scanning operation, finally with all data collected will make a 3D point cloud and proceeds to compare the values obtained from measurements in each of the points before and after wear.

This technique allows quantifying the wear of the tool with an accuracy and precision of less than one micrometer, while the tool is rotating.

Capítulo 1. Introducción General

1.1. Antecedentes

Desde la antigüedad, las herramientas de corte han jugado un papel fundamental en la vida del hombre. Los primeros utensilios eran fabricados con herramientas de piedra pulimentada, estás fueron perfeccionadas hasta tener puntas mas aguzadas, aunque en un principio fueron utilizadas básicamente para adquirir alimentos, su utilización se extendió a la creación de herramientas más complicadas, armas y utensilios para construcción e incluso piezas de ensamble. Así con el transcurso de miles de años, las herramientas se fueron perfeccionando cada vez más.
Aunque el hombre siguió dependiendo en gran medida de la piedra, sus conocimientos lo llevaron al uso de madera, hueso y finalmente materiales modernos.

Cuando finalmente se inicio el uso y creación de máquinas herramientas para la fabricación en serie, el estudio de las máquinas y de los factores de desgaste de las mismas se ha vuelto un campo de estudio muy amplio y sobre todo necesario.
En la industria metal mecánica, los recientes cambios que se han venido suscitando, los diferentes sistemas de fabricación, la creciente demanda y la competencia han dado origen a la necesidad de crear sistemas de manufactura mucho más flexibles y eficientes en costos, tiempo de producción y un máximo aprovechamiento de los recursos. Así, por ejemplo los modernos sistemas industriales en los cuales el herramental de la máquina es controlado por la computadora, tienden a ser usados ampliamente.

Es muy difícil proporcionar todas las condiciones óptimas de fabricación, para poder establecerlas se tiene que considerar la materia prima, la velocidad optima de corte, los lubricantes y refrigerantes, el tipo de herramental, el material del que está hecho y la profundidad de corte, entre otros. Así un problema importante en el área de fabricación es la necesidad de supervisar continuamente el proceso, esto se realiza con el fin de localizar a tiempo los cambios en dicho proceso que pudieran afectar las condiciones previamente establecidas.

Por lo cual durante mucho tiempo se han utilizados métodos estadísticos, modelos matemáticos simples y complejos, estudio de vibraciones y emisiones acústicas para facilitar esta tarea.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Contar con un sistema de montaje para la herramienta y el sensor, el cual permitirá que la herramienta gire completamente sobre su eje mientras el sensor adquiere los datos y éstos son guardados para su posterior análisis.

1.2.2. Objetivos específicos

- Determinar la magnitud del desgaste de los insertos de la herramienta de corte.
- Visualizar gráficamente mediante coordenadas polares la condición de la herramienta de corte.
- Obtener una nube de puntos en 3D que represente el perfil de la herramienta de corte.

1.3. Alcances y limitaciones

Visualizar y cuantificar la condición del desgaste de los insertos en una herramienta rotatoria utilizada en operaciones de fresado.

Este trabajo es puramente experimental y será útil para futuros trabajos en el área, por lo cual la herramienta no realiza ningún tipo de maquinado.

La rotación de la herramienta es realizada mediante un motor a pasos, el cual se desplaza 1.8 grados por cada paso, este motor es controlado mediante una pic-step, la cual es una tarjeta que permite controlar la velocidad y dirección del giro del motor, además con esta tarjeta se puede lograr que el motor realice medios pasos, esto es desplazamientos de 0.9 grados, por lo cual es posible obtener un muestreo de 400 puntos en 360 grados.

1.4. Justificación

En México existe una creciente industria manufacturera en la cual se utiliza una gran cantidad de herramientas de corte dentro de sus variados procesos de manufactura, aunado a eso el nuevo plan de desarrollo manifiesta su interés para que las instituciones de educación superior y centros de investigación, enfoquen sus proyectos de desarrollo científico y tecnológico a solucionar problemas vinculados a la industria.

Los procesos de corte están evolucionando constantemente; por lo cual es importante predecir el comportamiento de las herramientas, ya que esto es un factor importante dentro del proceso de manufactura y ayuda considerablemente a obtener piezas maquinadas de buena calidad, ya que las exigencias y requerimientos en cuanto a la exactitud y precisión del producto generado requieren un monitoreo exhaustivo. La medición y el control del desgaste sufrido por las herramientas es uno de los parámetros que afectan directamente la calidad de las piezas, por lo cual se requiere generar la tecnología adecuada, para satisfacer los requerimientos mencionados. Se propone el monitoreo de la condición de una herramienta de corte mediante un sensor laser de desplazamiento, dado que su aplicación ha demostrado que detecta variaciones desde unas cuantas decimas de micras hasta un milímetro, por lo cual el sensor utilizado sería capaz de detectar desde una fase temprana de desgaste hasta una fractura de la herramienta de corte.

1.5. Estructura de la Tesis

El presente trabajo está dividido en 5 capítulos, en el capítulo 1 se describe la parte introductoria, justificación del trabajo y los objetivos del mismo. En el capítulo 2 se describe el estado del arte iniciando por las máquinas herramientas, materiales de herramientas, tipos y causas del desgaste, así como los tipos de monitoreo de herramientas de corte. En el capítulo 3 se definen las bases teóricas del sensor laser de desplazamiento, su principio de funcionamiento y las principales causas de error en el funcionamiento del sensor. En el capítulo 4 se describe la fase de adquisición de datos, se presenta la validación experimental los resultados y trabajos futuros. Finalmente en el capítulo 5 se pueden observar las conclusiones.

Capítulo 2. Marco Teórico

2.1. Proceso de mecanizado

Los procesos de mecanizado constituyen en la actualidad el conjunto de procesos de fabricación más ampliamente difundidos en la industria, ello se debe entre otras razones a su gran versatilidad en la obtención de diferentes tipos de geometría con altas especificaciones de precisión dimensional, comparados con otros procesos.
Esta difusión ha sido causa, entre otras razones de que los equipos propios de mecanizado hayan experimentado una evolución más elevada que los restantes en el campo de la automatización, siendo las máquinas de control numérico (CNC) el más claro ejemplo de este hecho.

Según el método empleado en la eliminación del material, los procesos de mecanizado se clasifican en dos categorías.

1. Procesos convencionales: la eliminación de material se realiza fundamentalmente por medios mecánicos. Los procesos de torneado y fresado pertenecen a este grupo.
2. Procesos no convencionales: la eliminación de material se debe fundamentalmente a otros medios diferentes de los mecánicos (eléctricos, físico-químicos, etc.) a este grupo pertenecen los procesos de electroerosión y fresado químico [14].

2.1.1. Elementos de un proceso de mecanizado convencional

La realización de un proceso de mecanizado requiere la intervención de los siguientes elementos:

- Pieza
- Herramienta
- Máquina herramienta
- Sistema de control

2.1.1.1. Pieza

El término “pieza” se refiere al elemento, generalmente metálico que es objeto de la transformación durante el proceso de maquinado. Mientras se encuentra en su estado de preforma, la geometría de la pieza presenta una sobre dimensión respecto a las medidas finales a obtener. En la gran mayoría de las ocasiones el material sobrante se elimina mediante una serie de operaciones sucesivas que van aproximando la geometría de la preforma a la pieza terminada. Las operaciones intermedias de este proceso se denominan como operaciones de desbaste, mientras que a la última operación se le designa como operación de acabado. Una vez concluido el proceso de maquinado, la pieza debe de encontrarse dentro de las especificaciones dimensionales de diseño.

2.1.1.2. Herramienta

Es el elemento que entra en contacto directo con la pieza, y produce la eliminación del material sobrante de la preforma.

Una herramienta de corte, está formada de una o varias aristas o filos, en la figura 1 se muestran algunas herramientas de corte. Dentro de estas herramientas de corte, resultan de gran interés la denominada cara de incidencia o flanco, la cual es la parte que queda enfrentada a la superficie mecanizada de la pieza de trabajo y también la cara de desprendimiento, esta es aquella por la que se desprende el material eliminado o viruta.

La herramienta se completa con una parte no activa que permite su fijación a los elementos de sujeción de la máquina-herramienta.

Figura 1. Diferentes tipos de herramientas de corte [6]

Según sus características pueden considerarse herramientas enterizas, cuando toda la herramienta es del mismo material y, herramientas de plaquitas o insertos, cuando la parte activa es de diferente material respecto al resto de la herramienta. Se denominan de esta forma porque la parte activa está conformada por pequeñas placas generalmente de carburo.

2.1.1.3. Máquina herramienta

Esta se encuentra constituida por el conjunto de dispositivos que permiten el desplazamiento relativo entre la pieza de trabajo y la herramienta de corte, para lograr de esta forma la eliminación del material sobrante de la preforma. Estos dispositivos pueden agruparse como:

- Dispositivos de sujeción
- Dispositivos de accionamiento

2.1.1.4. Sistema de control

Aquí se engloban los dispositivos encargados de controlar los desplazamientos referentes a la pieza y la herramienta de corte. En las máquinas convencionales el control suele ser realizado por acciones del operador. En las máquinas de control numérico, este tipo de acciones son realizadas por el propio sistema de control de la máquina sin que exista una intervención directa del operador sobre el proceso de eliminación de material [14].

2.2. Material de piezas mecanizadas

El material del cual están constituidas las piezas a mecanizar es uno de los factores esenciales para la realización del proceso de mecanizado, no obstante aún conociendo las propiedades físicas del material usado en el maquinado, no resulta sencillo predecir su comportamiento dentro del proceso de mecanizado debido al elevado número de factores que inciden sobre él, existen recopilaciones experimentales que recogen las condiciones de trabajo más habituales para diferentes operaciones de mecanizado y tipos de materiales, sin embargo los valores recomendados difícilmente se ajustan a una situación en concreto, aunque ciertamente fungen como punto de partida para el ajuste final de cierta situación en

particular. De una forma general se pueden enumerar una serie de factores ligados al material de la pieza de trabajo que inciden directamente sobre el comportamiento de un determinado material. Entre los principales pueden mencionarse:

- La composición química, y
- El comportamiento térmico [14].

La figura 2 se muestra los valores usuales de dureza y velocidad de corte para algunos materiales de herramientas de corte.

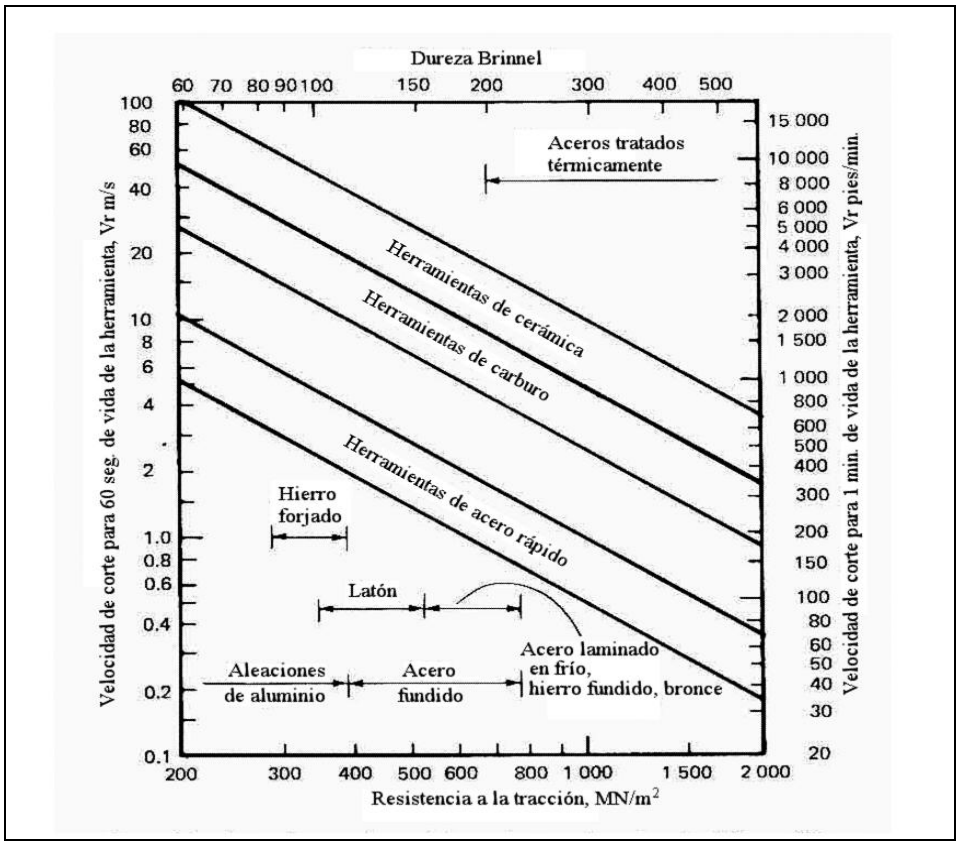


Figura 2. Valores usuales de dureza y velocidad de corte [7]

La composición química del material de la pieza condiciona en gran parte de las condiciones mecánicas de la misma, estas condiciones mecánicas influyen en el comportamiento de dicha pieza; así el proceso de maquinado de un metal puro o aleación puede verse afectado por pequeñas variaciones en la composición de la preforma.

La estructura del material implica que, los materiales con la misma composición química, puedan presentar diferentes comportamientos desde el punto de vista de la

maquinabilidad. El tamaño y orientación del grano, la forma y distribución de los elementos aleados, los estados tensiónales originados (endurecimiento por deformación) en procesos de conformación previos, o la acritud son algunos de los factores más significativos a considerar dentro de este grupo.

El comportamiento térmico puede ser contemplado desde dos puntos de vista. El primero de ellos dictamina que a partir de la conductividad térmica del material se facilitará o dificultará la eliminación de calor en la zona de deformación, dicho en otras palabras, valores crecientes de conductividad térmica mejoran la maquinabilidad. El segundo punto de vista tiene que ver con las modificaciones que un incremento de temperatura puede producir en las propiedades mecánicas e incluso en la composición química o la estructura del material [14].

2.3. Material de Herramientas de Corte

Debido a su importancia en los procesos de mecanizado, existe una amplia variedad de materiales empleados en la elaboración de la parte activa de la herramienta. La elección de uno u otro depende fundamentalmente de las propiedades mecánicas del material a mecanizar y de los requerimientos del proceso de maquinado. Por lo general se requiere una elevada dureza y una gran resistencia al desgaste que permita a la herramienta de corte eliminar continuamente material, de igual manera es esencial que estas propiedades se conserven a altas temperaturas, debido al incremento de calor producido en la zona de corte como consecuencia del rozamiento entre la pieza y la herramienta de corte. Como materiales más usados en la parte activa de la herramienta se pueden considerar los siguientes:

1. Aceros rápidos
2. Carburos metálicos
3. Materiales cerámicos
4. Materiales diamantados

2.3.1. Aceros rápidos

Se les denomina así por permitir altas velocidades de mecanizado en relación a otros aceros, están constituidos por un grupo de aceros con contenido de carbono

de entre 0.7 y 0.9% además de una serie de aleaciones de cobalto, wolframio, cromo, molibdeno y vanadio.

2.3.2. Carburos metálicos

También denominados metales duros, están constituidos por carburos de wolframio con cobalto, carburos de Titanio y de Tántalo. En la actualidad cuentan con recubrimientos de Nitruro de boro, el cual le proporciona a la herramienta valores elevados de dureza y resistencia al desgaste.

2.3.3. Materiales cerámicos

Contienen Alúmina o Nitruro de silicio como constituyentes básicos. Presentan una elevada dureza así como una gran fragilidad. Existen materiales denominados cermets, que son una mezcla de materiales cerámicos y metales obtenida mediante sinterizado.

2.3.4. Materiales diamantados

Estos emplean diamante en polvo y aglutinante como elementos básicos. Presentan la máxima dureza frente al resto de los materiales, pero sus principales inconvenientes son su elevado costo y gran fragilidad.

2.4. Procesos de corte

Los procesos de corte remueven el material de la superficie de la pieza de trabajo al producir rebaba o viruta. Dentro de la industria del mecanizado de metales, son dos los procesos mayormente utilizados, estos son: torneado y fresado, los cuales presentan las siguientes características:

Torneado; se subdivide en: torneado longitudinal y torneado transversal (ver figura 3) en el primer caso la pieza de trabajo gira, mientras la herramienta de trabajo desbasta material; en el segundo caso la herramienta de corte se mueve radialmente hacia el centro, por lo cual va formando espacios vacios hasta lograr la geometría deseada.

Fresado: este se clasifica en: fresado horizontal y fresado vertical. Para el caso del fresado horizontal, la herramienta es del tipo rotatorio y presenta su eje de giro de manera horizontal, es capaz de remover un espacio de material de la superficie de la pieza mecanizada. En el fresado vertical, la herramienta rotativa presenta un eje de giro vertical, esta se desplaza a cierta profundidad de la preforma y produce una cavidad.

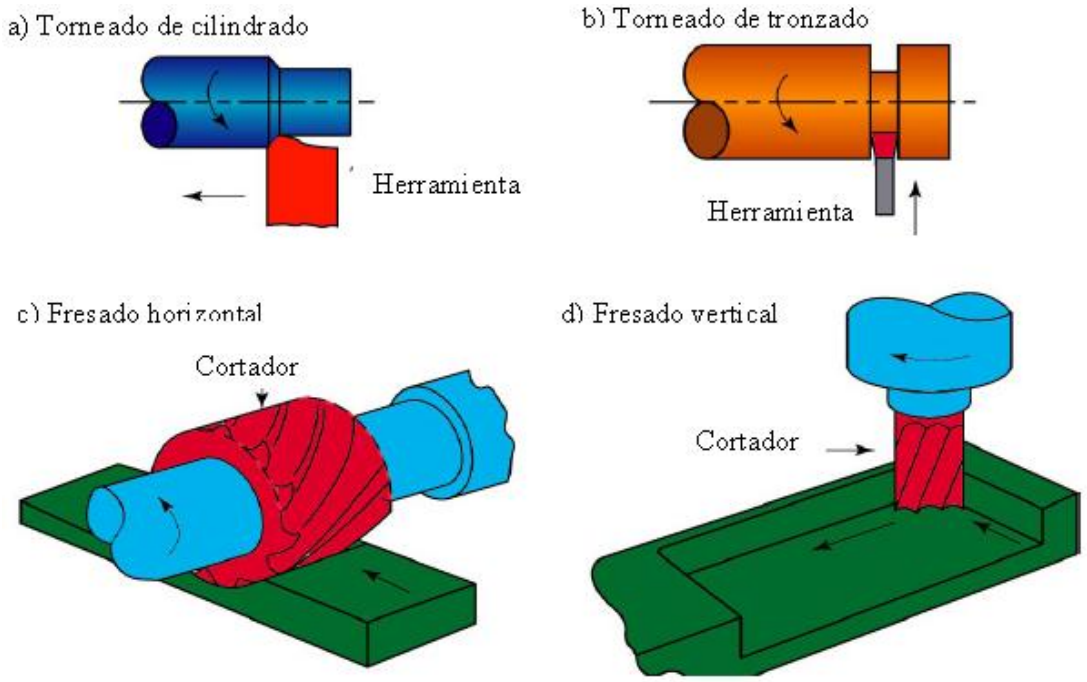


Figura 3. Procesos de torneado y fresado [1].

Dentro de los procesos de corte por arranque de viruta existen variables de proceso; de forma independiente y dependiente, que interactúan entre los parámetros de corte.

Variables independientes:

- Material de la herramienta, revestimiento y condición de la herramienta.
- Forma de la herramienta, acabado de la superficie y filo.
- Parámetros de corte, velocidad, alimentación y profundidad de corte.
- Características de la máquina herramienta.

Las variables dependientes son aquellas que se ven influenciadas por cambios en las variables independientes, estas son:

- Tipo de viruta.
- Fuerza y energía dispersa en el proceso de corte.
- Temperatura de la pieza de trabajo, viruta y herramienta.
- Desgaste y falla de la herramienta.
- Acabado de la superficie producida en la pieza de trabajo después del corte.

2.5. Duración y desgaste de la herramienta

En todo proceso de manufactura tiene que haber un equilibrio entre el volumen y los costos de producción Es por esto que un tema de mucha importancia es el desgaste y duración de la herramienta de corte bajo las distintas condiciones de trabajo.

2.5.1. Desgaste de la herramienta

La vida de la herramienta de corte puede terminar por varias causas, pero éstas pueden separarse en dos grupos principales:

1. El desgaste progresivo de la herramienta.
2. Fallas mecánicas que lleven a la herramienta a un final prematuro.

El desgaste progresivo de la herramienta se puede producir de tres maneras distintas:

- Desgaste por abrasión: ocurre cuando materiales más duros que la herramienta toman contacto con ésta rayándola y desgastándola.
- Desgaste por adhesión: como en la zona de corte existe una alta temperatura, el material de corte y la herramienta se sueldan y, al separarse parte de la herramienta se desprende.
- Desgaste por difusión: se produce a partir del aumento de temperatura de la herramienta, con lo que se produce una difusión entre las redes cristalinas de la pieza y la herramienta, debilitando la superficie de la misma.

El desgaste se puede observar en dos regiones de la herramienta, la cara y el flanco.

El desgaste en la cara se presenta como un cráter, lo que es un resultado del paso de viruta caliente al fluir a lo largo de la cara.
Por otro lado, el desgaste del flanco es plano y es causado por el roce entre la pieza y la herramienta; en este caso se pueden distinguir tres períodos de desgaste en la vida de una herramienta, los cuales se pueden observar en la figura 4.

- Fractura inicial, el filo agudo se desportilla rápidamente.
- Desgaste progresivo uniforme.
- Fractura rápida, el desgaste progresa a una tasa creciente.

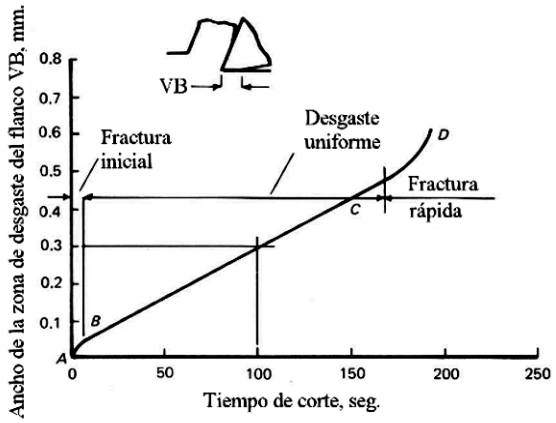


Figura 4. Períodos de desgaste en la vida de una herramienta [7]

La figura 5 ilustra el desgaste en la cara y el flanco de una herramienta en una operación de mecanizado.

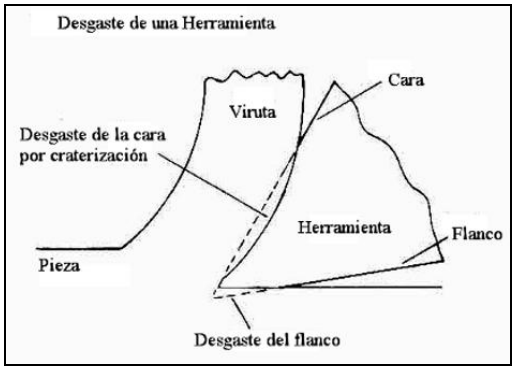


Figura 5. Desgaste en la cara y el flanco de una herramienta [7]

Las fallas mecánicas se pueden producir en cualquier momento, debe existir por lo tanto precaución ante el hecho de usar inadecuadamente un avance o encaje

demasiado grande, pues al ocurrir una falla de este tipo, la herramienta será inútil inmediatamente, y su costo es alto.

2.5.2. Criterios de duración de una herramienta

El criterio de duración de una herramienta permite obtener un valor mínimo de tiempo de vida para la herramienta de corte antes de que se desgaste. Como en las operaciones de mecanizado el desgaste del cráter y del flanco no son uniformes a lo largo del filo principal, se debe especificar la locación y el grado de desgaste permisible para cada caso.

En la figura 6 se muestra una herramienta ya desgastada. La profundidad del cráter (KT) es medida desde el punto más profundo de éste. También puede apreciarse que el desgaste del flanco es mayor en los extremos del filo principal.

Como el desgaste no es uniforme en las zonas C, B y N, se considera un ancho promedio para la zona central, cuyo valor se estima igual al ancho que existe en la parte más uniforme del desgaste y se denomina VB.

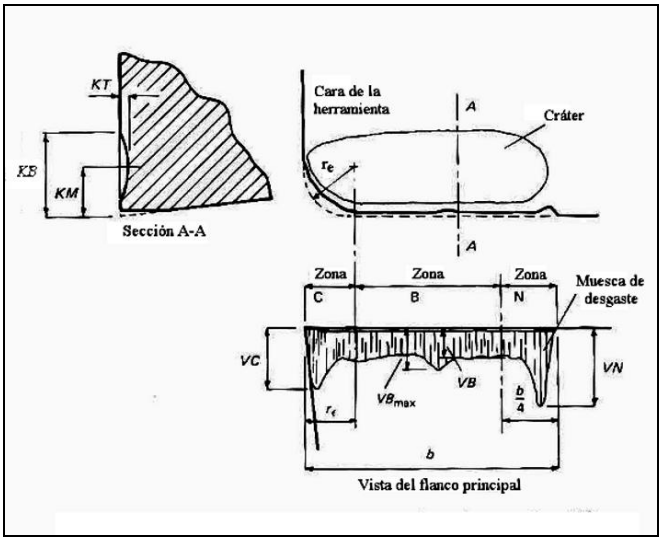


Figura 6. Partes de una herramienta desgastada [ISO/TC 29/1NG 22.2]

2.5.3. Criterios para reemplazar una herramienta

Los criterios recomendados por la ISO para definir la duración efectiva de una herramienta son:

Para herramientas de acero rápido o cerámica:

- Por rotura
- Cuando VB promedio = 0,3 mm
- Cuando $VB_{máx}$ = 0,6 mm

Para herramientas de carburo cementado:

- Por rotura
- Cuando VB promedio = 0,3 mm
- Cuando $VB_{máx}$ = 0,6 mm
- Cuando KT = 0,06 + 0,3 * f, donde f es el avance

2.6. Monitoreo de la herramienta de corte

Las últimas tendencias en el mercado del mecanizado van dirigidas hacia una mayor precisión, el uso de tolerancias más pequeñas e incluso mejores acabados superficiales en componentes cada vez de menor tamaño, más compactos y con mayores funcionalidades. En consecuencia, esta tendencia está impulsando el resurgir de nuevas tecnologías de mecanizado y diseño de máquinas herramienta como por ejemplo el nano-mecanizado o el pulido de precisión entre otros. Todo ello conlleva nuevos requisitos para los sistemas de monitoreo con el fin de aumentar la precisión y calidad de los productos, reduciendo los costos de fabricación.

El fresado es una de estas tecnologías de componentes más directamente afectado, ésta tecnología permite la producción de geometrías micrométricas complejas con relativamente elevados caudales de viruta mediante el uso de herramientas de diámetro incluso de valores milimétricos. Sin embargo, las principales razones que reducen el rendimiento del fresado son una duración de vida impredecible de la herramienta de corte y una prematura rotura de ésta.

Durante el fresado se pueden dar tres mecanismos de rotura; obstrucción de la viruta (se produce cuando la viruta no se elimina con la suficiente velocidad del área de mecanizado creando un aumento de las fuerzas de corte y tensiones en la herramienta por encima del límite de rotura), rotura por fatiga (al

aumentar el desgaste de las herramientas, las fuerzas de corte y tensiones aumentan por encima del límite) o excesiva tensión (se produce cuando la deflexión de la herramienta está por encima de sus límites de rigidez al perder la arista de corte su geometría, sufrir daño parcial o depositarse cierta cantidad de material en ella).

En el caso del fresado convencional, el operario es quien interpreta el comportamiento de las condiciones de corte tanto a nivel visual como auditivo. No obstante, en el fresado resulta imposible detectar visualmente la rotura de micro-herramientas debido a su reducido tamaño, las virutas generadas y el empleo de lubricante. Asimismo, el sonido característico del proceso presenta una magnitud tan reducida que es imposible diferenciar cualquier variación en las condiciones de mecanizado, inclusive la rotura. Por lo tanto, la única solución para mejorar la productividad del fresado es el empleo de sistemas de monitorizado para el análisis del estado de la herramienta.

La tecnología de sensores ha evolucionado siendo inicialmente una simple herramienta de diagnóstico para el mecanizado hasta llegar a ser un componente integral con sistemas inteligentes de toma de decisión. En el periodo 1950-1980, un amplio rango de sensores (termopares, acelerómetros, galgas extensiométricas o sensores de emisión acústica) fueron empleados para monitorizar determinados parámetros característicos, especialmente el desgaste de la herramienta, las fuerzas de corte y las vibraciones y roturas de herramienta [26].

A principios de los 90, gracias al avance de las técnicas de procesado de señal y las investigaciones sobre inteligencia artificial se desarrollaron nuevas aplicaciones para los sistemas de monitorizado para el análisis del estado de la herramienta [27].

Actualmente, se está produciendo una tendencia de integración de los sensores empleados en el desarrollo de los sistemas de monitorizado para el análisis del estado de la herramienta [32]. Estas soluciones permiten monitorizar con mayor eficiencia entre otros el proceso de fresado, y sobre todo se están generando

técnicas mucho más fiables de detección de rotura de herramientas.
Los métodos de detección de rotura de herramienta que existen actualmente se pueden clasificar en dos grupos bien diferenciados; los métodos directos y los indirectos. Los métodos directos se basan en el sensado óptico mientras que los indirectos monitorizan las condiciones de herramienta por medio de parámetros asociados. La limitación en cuanto a accesibilidad del área de mecanizado conlleva una mayor predilección por los métodos indirectos tales como medición de fuerzas de corte, emisiones acústicas, vibración de la pieza/herramienta o variación de la intensidad del motor.

Los sistemas de monitoreo para el análisis del estado de la herramienta existentes en la actualidad presentan relaciones de costo/funcionalidad muy elevados y son mayoritariamente aplicables en un rango de condiciones de corte muy limitados. Por ello, se requieren soluciones fiables y económicamente ajustadas con el fin de obtener un mejor empleo de las maquinas y herramientas de corte empleadas, y en consecuencia, mejorar la calidad de los componentes fabricados.

2.7. Desarrollo de los métodos de monitoreo

Se han encontrado cinco criterios que se consideran decisivos para la evaluación del estado de la herramienta de corte, estos son:

- Calidad de la superficie de la pieza
- Ruido del proceso
- Ocurrencia de chispas
- Características visibles de desgaste
- Ocurrencia de quemaduras en el área de remoción de metal

Todos estos indicadores son acompañados por un desgaste visible; en algunos casos las herramientas de corte se consideran como desgastadas desde una evaluación visual, aun si no se presenta alguno de los criterios anteriormente mencionados. Para lograr un control efectivo, las investigaciones se han centrado en la medición indirecta de las características del proceso de maquinado, tales

como, fuerzas de corte, fuerzas de empuje o avance, temperatura, emisiones acústicas, vibraciones, o bien dos o más combinaciones de estas características.
A continuación se analizan tres soluciones de detección de rotura de herramientas.

2.7.1. Sistema Láser de Reflexión de Haz Único [3]

Los principales componentes de este sistema indirecto son un sensor láser de reflexión y un amplificador para el procesado de la información. El sensor está unido al cabezal de la máquina mediante un soporte de reloj comparador. Las condiciones de la herramienta son monitorizadas enfocando el láser de haz único de 50µm constantemente sobre la herramienta de corte, y al mismo tiempo guiando el haz reflejado hacia el receptor. Con el fin de disminuir áreas 'no visibles', el haz láser se enfoca algo por encima de la longitud de corte de la herramienta con distintas inclinaciones (α), tal y como se muestra en la figura 7. La intensidad de la luz reflejada se analiza por medio de un amplificador detectando indirectamente cualquier rotura de herramienta.

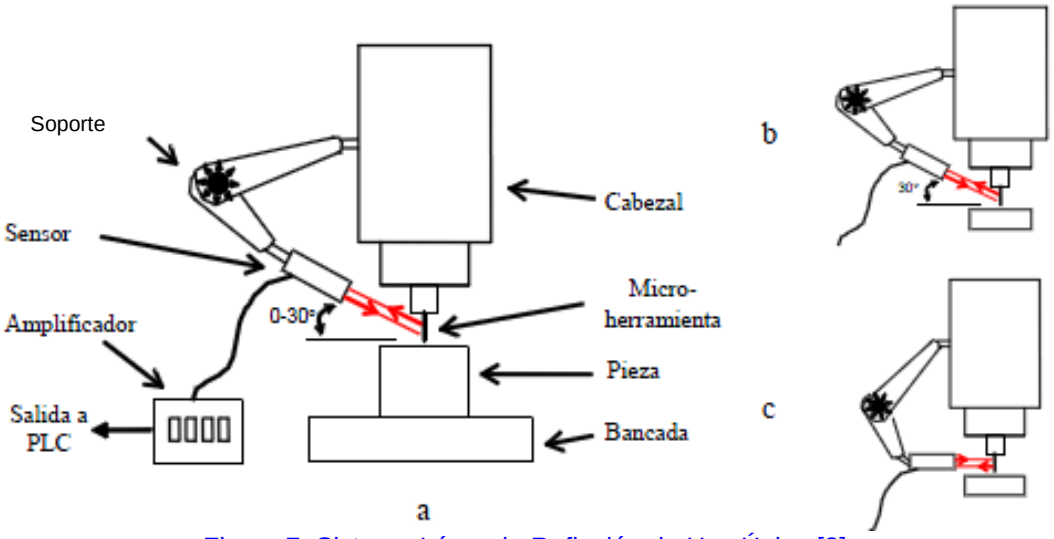


Figura 7. Sistema Láser de Reflexión de Haz Único [3]

2.7.2. Sistema de Monitorizado de Tensión Herramienta-Pieza [3]

La figura 8 representa el principio básico del sistema propuesto. La detección de rotura de herramienta se realiza gracias a la aparición de cambios bruscos de tensión durante el proceso de corte, cuando la herramienta deja de estar en

contacto con la pieza. Los rodamientos cerámicos son típicos en cabezales de velocidades de giro elevados quedando aislada la herramienta del cuerpo de la máquina. Por tanto, se ha diseñado e incorporado un condensador (C) al sistema con el fin de monitorizar la tensión durante el mecanizado. Este diseño presenta la ventaja de evitar cualquier contacto directo entre la parte rotatoria del cabezal y el sensor, algo absolutamente prohibitivo debido a las elevadas revoluciones empleadas y al riguroso equilibrado de masas que exige este tipo de cabezales. La detección de roturas se ha llevado a cabo tomando medidas (valores) de la tensión alterna creada por medio del generador de señales en los puntos a-b y transformando esta señal en una señal continua TTL mediante un procesado de señales. Posteriormente esta señal se envía a un controlador (PLC) para su empleo en el control de fractura de la herramienta.

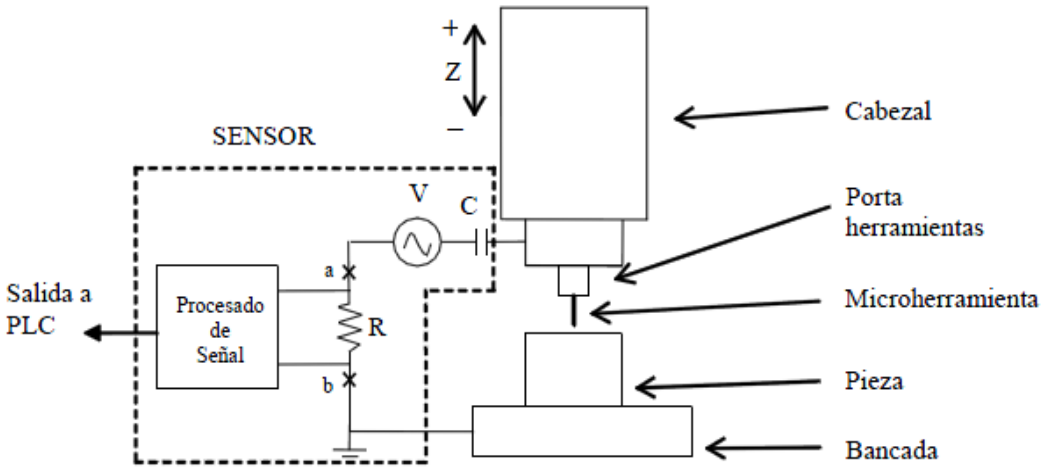


Figura 8. Sistema de Monitorizado de Tensión Herramienta-Pieza [3]

2.7.3. Sistema Láser Off-line [3]

Este sistema requiere la implementación de subrutinas para la medición de herramientas a través del control numérico (CNC). Las mediciones se efectúan off-line mediante el uso de sistemas láser, los cuales actualmente se pueden usar en la gran mayoría de máquinas de mecanizado para el referenciado automático de herramientas.

En particular, la herramienta es medida en intervalos de tiempo predefinidos o cada vez que la herramienta se retrae a un nivel en Z determinado.

Esto se lleva a cabo ejecutando un ciclo especialmente desarrollado para la detección de fractura, el cual verifica rápidamente la longitud de la herramienta una vez y vuelve a su posición inicial.

Cabe resaltar que durante la ejecución de esta subrutina no se altera la velocidad de rotación de la herramienta, manteniendo constante la temperatura del cabezal y el consiguiente alargamiento por dilatación. Esta ventaja permite a su vez retomar el mecanizado inmediatamente finalizado el ciclo de control. Si se detecta algún tipo de rotura, aparece un mensaje de error en pantalla y automáticamente se para el programa en ejecución del CNC. La figura 9 resume esquemáticamente las operaciones del sistema.

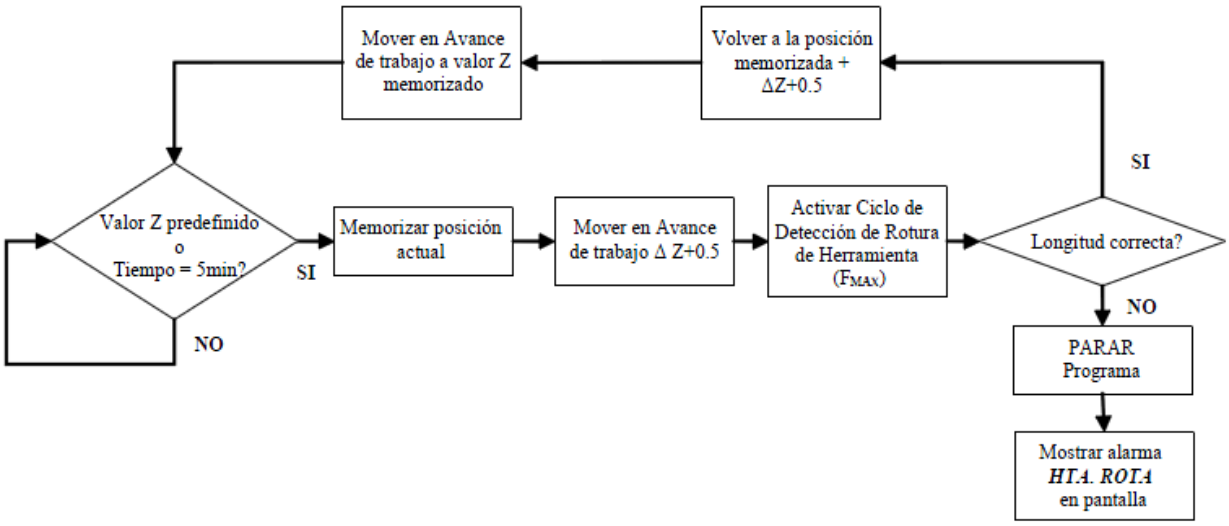


Figura 9. Esquema de las operaciones del sistema Laser Off-line (SLO) [3]

Capítulo 3. Sensor láser de desplazamiento

3.1. Funcionamiento

Probablemente hay más opciones para medir el desplazamiento que ningún otro tipo de variable cuantificable, creando así una gran variedad de sensores y distintas tecnologías aplicadas a la resolución del problema del desplazamiento, siendo los sensores láser una de estas.

Los rangos de medición de estos sensores son muy amplios, desde de unas pocas micras, hasta rangos muy elevados (200m).
Los sensores de desplazamiento, son empleados para medir diferentes rangos de distancia.

El sensor utiliza un diodo láser cuyo haz es reflejado por la superficie del objeto cuya distancia se desea conocer. La luz del láser que alcanza a ser reflejada en la superficie es enfocada al detector a través de una lente. La posición de la imagen del punto de luz en el detector dependerá por lo tanto de la posición de la superficie reflectora con respecto al dispositivo (Fig. 10). Utilizando triangulación, esta posición de la imagen en el detector es la que nos dará información sobre la distancia a la que se encuentra la superficie de interés.

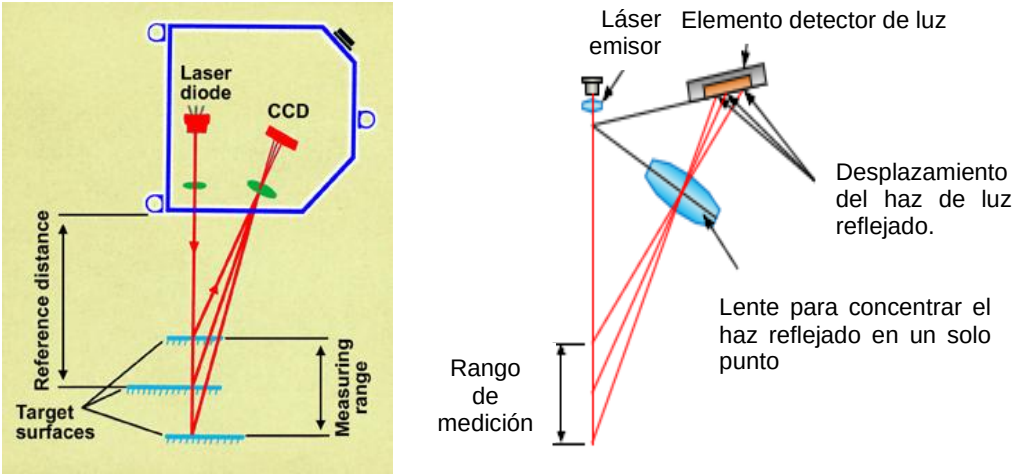


Figura 10. Funcionamiento sensor láser de desplazamiento [8], [9]

Para este caso en particular el elemento receptor es un CCD, el cual es un circuito integrado que contiene un número determinado de condensadores enlazados o acoplados. Bajo el control de un circuito interno, cada condensador puede transferir su carga eléctrica a uno o a varios de los condensadores que estén a su lado en el circuito, así que básicamente es un chip que convierte las señales luminosas en señales eléctricas (carga). La carga es leída y convertida en cuentas por segundo, dicho en otras palabras, periódicamente se lee el contenido de cada pixel, haciendo que los electrones se desplacen físicamente desde la posición donde se originaron (en la superficie del chip), hacia el amplificador de señal, con lo que se genera una corriente eléctrica que será proporcional al número de fotones que llegaron al pixel.

De esta manera se tiene que la posición de la luz captada en el CCD se desplaza a medida que cambia la posición del objeto. La cantidad de desplazamiento del objeto se mide detectando este cambio (ver figura 10 y 11), esta magnitud es amplificada y procesada mediante la electrónica de la unidad de interface del detector.

3.2. Principio de medición

El rayo láser se enfoca sobre la cara de la herramienta que estará en contacto con la pieza y reflejará una imagen (punto) al CCD a través del sistema óptico.
La posición de la imagen en el CCD variará conforme la herramienta se desgasta, como se aprecia en la figura 11.

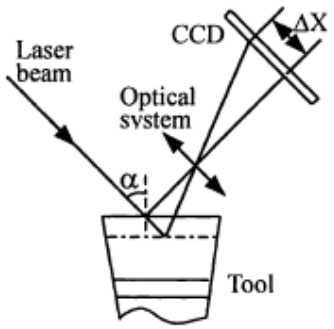


Figura 11. Principio de medición, Δx es el desplazamiento de la imagen en el CCD y α es el ángulo de incidencia [4]

3.3. Características del sensor

Sensor marca Keyence modelo LK-G10, funciona mediante el principio de triangulación, y cuenta con un CCD como elemento receptor, se alimenta con 24v de c.c. y 300mA, proporciona una repetitividad de 0,01 micras, lo cual quiere decir que la variación de las mediciones obtenidas mientras se mide el misma punto de un objeto no fluctuara en más de 0,01 micras (siempre y cuando no varíen las condiciones de medición). Además, cuenta con un pequeño CPU que detecta la superficie del objeto y ajusta la intensidad del láser al punto óptimo y es capaz de controlar el tiempo de emisión del láser, su potencia y la ganancia del CCD, con lo que se logra un amplio ajuste del rango de intensidad de luz recibida. Se puede realizar mediciones precisas a pesar de cambios drásticos en la condición de la superficie de la pieza a medir, en la figura 12 se puede ver la estructura interna del sensor.

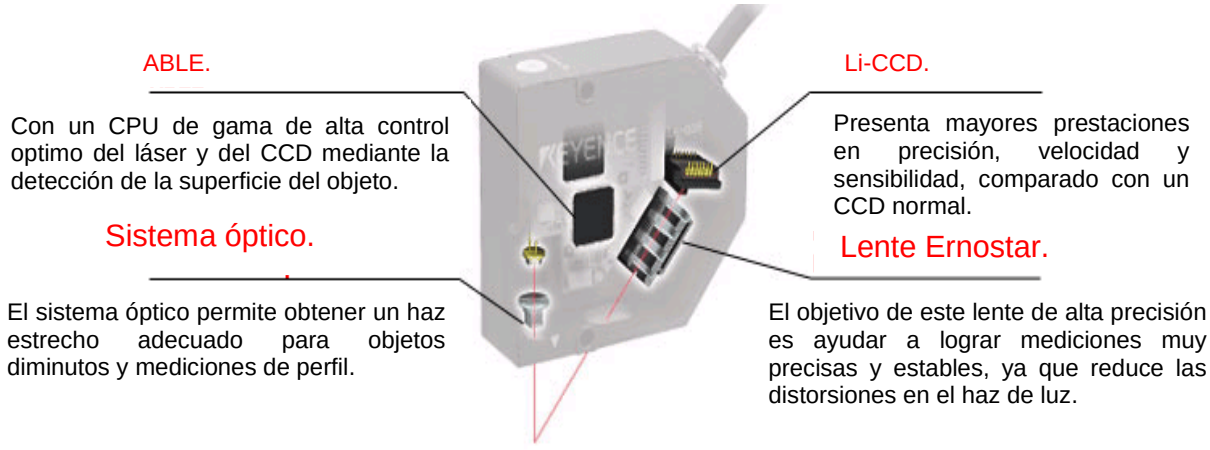


Figura 12. Características del sensor [10].

Anteriormente los errores causados por los cambios graduales generados en el borde de los píxeles constituían una barrera para obtener una mayor precisión, por lo cual el fabricante KEYENCE ha desarrollado un Li-CCD, el cual presenta una mejor señal en su salida, como se aprecia en la figura 13, este dispositivo obtiene la posición de la luz captada en un píxel, logrando reducir los errores en los bordes de los píxeles. Esto quiere decir que si una señal es registrada muy cerca de la unión entre dos pixeles el Li-CCD registra la posición captada sin transferir esta señal al pixel adyacente, como se hace generalmente en un CCD ordinario.

Supóngase un caso hipotético donde se cuenta con dos sensores láser de desplazamiento, uno con un CCD normal, el otro con un Li-CCD y se desea medir el desplazamiento de un objeto en 5 puntos diferentes (se sabe que el desplazamiento promedio es de 0.0004 mm), así los resultados obtenidos con el primer sensor son:

0.5661mm, 0.5665mm, 0.5668mm, 0.5676mm, 0.5676mm.

Mientras que los resultados obtenidos con el segundo sensor fueron:

0.5661mm, 0.5666mm, 0.5669mm, 0.5673mm, 0.5677mm.

Así se tiene que en el primer caso (sensor con CCD normal) se presenta un salto importante en la cuarta medición, mientras que en el segundo caso (sensor con Li-CCD) se observa una respuesta más uniforme. Esto es a lo que se refiere el hecho de que si una señal es registrada muy cerca de la unión entre dos pixeles el Li-CCD registra la posición captada sin transferir esta señal al pixel adyacente.

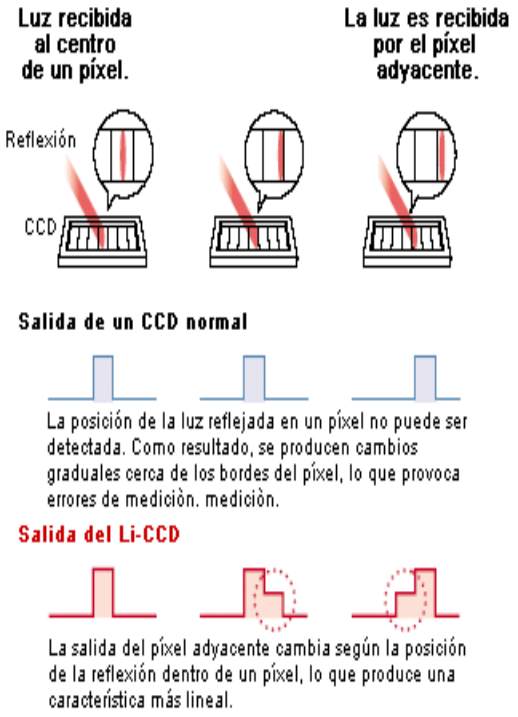


Figura 13. Diferencia en la salida entre un CCD normal y un Li-CCD, la principal ventaja de este dispositivo frente a un CCD normal consiste en que el Li-CCD registra la posición captada sin transferir esta señal al pixel adyacente [10].

Además el sensor dispone de un controlador, el cual permite conectar hasta dos cabezales de medición. Incorpora funciones estadísticas, salidas digitales y analógicas independientes para cada canal y comunicaciones RS-232 y USB, para cubrir una amplia gama de requisitos de medición y cuenta con una memoria interna de 65.000 puntos, la cual es capaz de almacenar las medidas a 50.000 muestras por segundo. Es posible almacenar temporalmente los datos en la memoria interna y recuperarlos durante el período posterior a la inspección, en la figura 14 se puede visualizar la parte frontal y posterior de este controlador.

Figura 14. Vista frontal y trasera del controlador [5].

En general los sensores de desplazamiento láser y los sensores de fibra óptica, convencionales emplean un PSD como elemento receptor. Sin embargo es recomendable utilizar un CCD (como lo hace el sensor utilizado en este proyecto), esto debido a que el PSD utiliza la distribución de la cantidad de luz que llega al elemento receptor para determinar el centro del mismo e identificar como posición del objeto. Sin embargo, la distribución de la cantidad de luz se ve afectada por la condición superficial del objeto causando variaciones en el valor de la medida. El CCD detecta el valor pico de la cantidad de luz en cada pixel, identificando así la posición del objeto. Por consiguiente, el CCD proporciona una alta precisión en medición de desplazamiento sin tener en cuenta la distribución de la cantidad de luz en el elemento receptor, un diagrama de esto se puede apreciar en la figura 15.

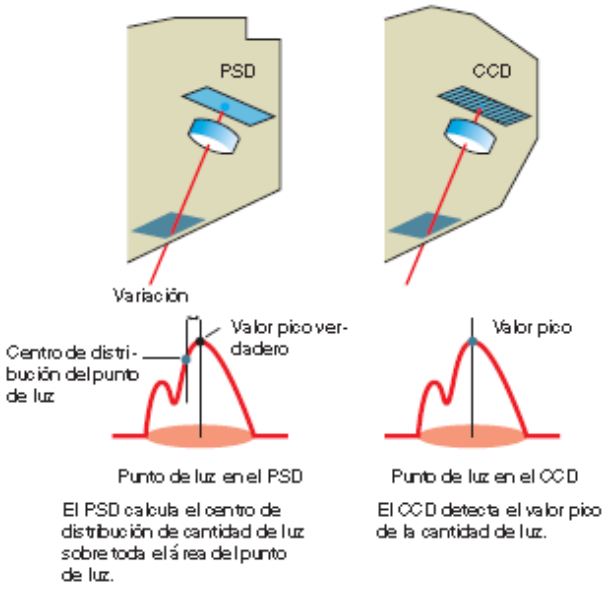


Figura 15. Funcionamiento de un PSD y un CCD [10].

3.4. Fuentes de Error

Las componentes de la variación en la medición se dividen a grandes rasgos en los siguientes 3 tipos:

- Componentes de la variación originados en el sensor de desplazamiento.
- Componentes de la variación provocados por el montaje.
- Errores de medición debidos a errores de posicionamiento de las partes.

Aunado a esto el sensor de desplazamiento puede presentar algún tipo de variación generada en su estructura, tales como:

- Variación inicial: se refiere a cambios en los valores de medición, que aparecen entre el momento del encendido y el momento en que la temperatura interna de los sensores de desplazamiento se estabiliza, por lo general esto toma de 30 minutos a 1 hora.

- Variación térmica: se refiere a la cantidad de cambio en el valor de la medición que se observa cuando la temperatura ambiente cambia, se expresa generalmente como *'% de F.E./°C'* (F.E.=Fuente de Error y es una constante que se puede consultar en el manual de usuario).

Ejemplo:

Suponiendo que se cuenta con un sensor cuyo rango de medición es de ±5mm, la temperatura ambiente varia 10ºC y el manual indica que las características de temperatura para este sensor son de 0.01% de F.E./ºC.

La variación térmica se expresa como:

$$F.E./°C * 2 * rango\ de\ medición * cambio\ en\ la\ temperatura\ ambiente \quad (3.1)$$

Sustituyendo los valores en la ecuación (3.1):

$$0.01 * 2(5mm) * 10°C = 10\mu m.$$

Para determinar la precisión del dispositivo inmediatamente después de su encendido, se puede calcular la variación inicial como una guía, en base a la variación térmica.

Si se conoce cuanto se eleva la temperatura interna del cabezal después del encendido, es posible calcular la variación inicial con la siguiente ecuación.

$$\Delta Temp.interior\ (°C) * Caracteristicas\ de\ temp.\left(\frac{\%\ de\ F.E.}{°C}\right) * Rango\ de\ medición \quad (3.2)$$

La dirección de la variación suele ser indeterminada. Esto se debe a que las características de la temperatura están dominadas por los desplazamientos en el sistema óptico del sensor.

El desplazamiento de los trayectos ópticos y la pérdida del enfoque se originan debido a la expansión y contracción del adhesivo que une al reflector, lente y elemento fotorreceptor, está es causada por los cambios de temperatura, un ejemplo de esto puede observarse en la figura 16.

Debido a que la relación entre la expansión/contracción del adhesivo y el desplazamiento de los componentes ópticos depende de las condiciones

individuales de ensamble, el control de la variación dependerá de esto y la dirección de la variación puede variar.

Para minimizar este efecto, en los sensores láser de desplazamiento la unidad y el recinto del lente están moldeados en una sola pieza, además los otros componentes están unidos con adhesivo y tornillos.

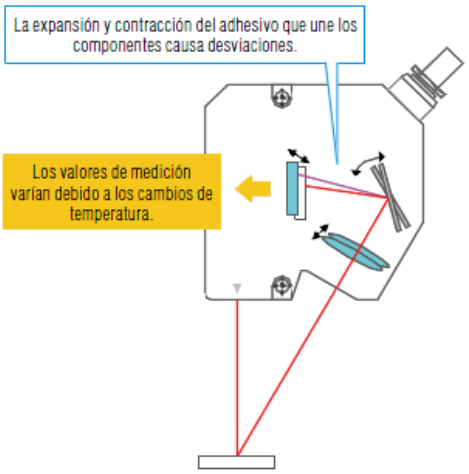


Figura 16. Desviación producida por fallas en el adhesivo [12].

Por lo cual se puede decir que las variaciones en la medición que con el tiempo sufre el sensor, son atribuibles principalmente a la expansión y/o contracción del adhesivo que mantiene unido el sistema óptico. Esta expansión y/o contracción es producida por leves cambios de temperatura y de humedad. Debido a esto las variaciones producidas cronológicamente en el adhesivo dependen de diferencias individuales entre los cabezales, y por ende la dirección de las variaciones es indeterminada.

En general se dice que un sensor de desplazamiento, que presenta cambios pequeños causados por la fluctuación térmica, tiene una estructura solida y que cambiara generalmente poco con el tiempo.

3.4.1. Variación provocada por el montaje

Las componentes de la variación térmica generadas por el montaje son aplicables únicamente en la dirección de la medición. El punto aquí es si el cabezal y la pieza de trabajo se sostienen por un soporte de una sola pieza o por soportes separados.

Si el soporte está formado de una solo pieza, el cálculo de la variación de distancia entre el cabezal y la pieza será suficiente.

Ejemplo:

- La distancia a la pieza de trabajo es de 30 mm.
- El soporte está hecho de aluminio.
- La temperatura cambia 10 ºC

El factor de expansión térmica del aluminio es de $23.2 * 10^{-6} \left[\frac{1}{°C}\right]$

$0.03\ m * 23.2 * 10^{-6} * 10°C = 6.96\ \mu m$

En la figura 17 se puede observar un claro ejemplo de una variación en la medición debida a la expansión térmica sufrida por el soporte.

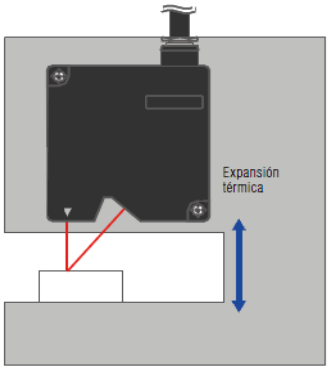


Figura 17. Expansión térmica en el soporte [12].

Si el soporte no está formado de una sola pieza, es necesario conocer el punto de apoyo estructural de los componentes y el cálculo es difícil en muchos casos. La variación es mayor que la de los soportes de una sola pieza en la mayoría de los casos.

La variación de los soportes incluye componentes estructurales de la variación, además de variaciones térmicas, por lo tanto.

Variación estructural=Componente de la variación + tensión residual en los tornillos

Estas componentes de la variación son difíciles de calcular. Sin embargo, la mayoría de las componentes de la variación en la dirección de la gravedad pueden eliminarse si se mide en la dirección horizontal, como se aprecia en la figura 18.

Por otro lado, es difícil eliminar por completo la tensión residual en tornillos que sujetan el cabezal. Por lo general se dice que la tensión desaparece de 6 a 12 horas después de que se monta el cabezal, y que una variación en el orden de pocas micras puede ocurrir durante este periodo.

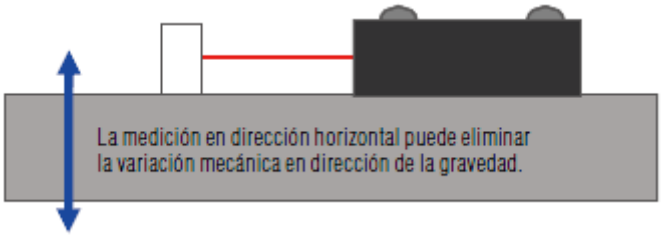


Figura 18. Eliminando la variación mecánica [12].

3.4.2. Reducción de las fluctuaciones de medición

Uno de los puntos a considerar, con respecto a la exactitud en la medición de alta precisión, al utilizar un sensor laser de desplazamiento es la 'resolución estática', está se calcula mediante:

Resolución estática = variación del valor de medición sobre objeto en reposo

La resolución estática, no debe confundirse con la repetitividad, en este caso la repetitividad está dada por:

Repetitividad = Variaciones del valor de medición al medir el mismo objeto en el mismo punto, moviéndolo repetidamente, exactamente a la misma posición.

Cuando se identifican las causas de las fluctuaciones de medición, en muchos casos, el origen se debe a la 'resolución estática'.

3.4.2.1. Componentes de variación del sistema de medición

Las especificaciones del sensor de desplazamiento contienen siempre valores de 'resolución estática'. Un sensor de desplazamiento láser tiene los siguientes cuatro elementos que determinan la resolución estática (ver figura 19).

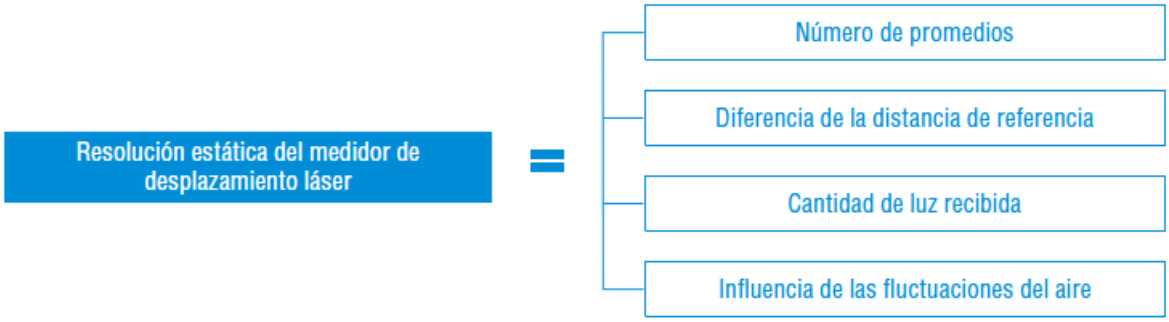


Figura 19. Elementos que determinan la resolución estática [12].

3.4.2.1.1. Numero de promedios

Si la baja resolución es producto de las variaciones diminutas en la superficie del objeto, entonces aumentando el número de promedios, N, se puede reducir la variabilidad en un factor de $\frac{1}{\sqrt{N}}$. Si aumentar el número de promedios es imposible, debido a restricciones en el tiempo para la medición, se puede emplear la variabilidad como referencia.

3.4.2.1.2. Diferencia de la distancia de referencia

Con un sensor de desplazamiento, que utiliza triangulación en un rango de medición corto (directriz: dentro de 50mm), la resolución estática mejora típicamente en los puntos cercanos a la distancia de referencia (ver figura 20). Sin embargo, la resolución estática es casi la misma para la distancia de referencia que para puntos próximos al sensor.

Figura 20. Resolución estática en la distancia de referencia [12].

3.4.2.1.3. Cantidad de luz recibida

Una cantidad insuficiente de luz recibida genera en los elementos optoelectrónicos una relación baja de señal a ruido y una disminución significativa de la resolución estática. Por lo tanto, asegurar una cantidad adecuada de luz recibida es el punto más importante para un sensor de desplazamiento láser.

Las siguientes situaciones son causas posibles de la insuficiencia de luz.

- Cuando se mide a través de un orificio, que bloquea parte de la luz recibida y no deja que regrese.

- Cuando se mide un objeto de alta reflexión especular con un ángulo muy pronunciado.
- Cuando la medición se hace a través de un filtro de cristal con baja transmitancia.

En los casos anteriores, se puede obtener una mejora, si se especifica un ciclo de muestro (tiempo de exposición del CCD) más largo.

3.4.2.1.4. Influencia de las fluctuaciones del aire

Si no se alcanza la resolucion nominal, a pesar de que todos los ajustes satisfacen las condiciones especificadas, es muy probable que esto se deba a la influencia de fluctuaciones de aire.

En un entorno típico, se producen convecciones de aire a causa de diferencias pequeñas de temperatura. El aire de la misma temperatura forma una masa de cierto tamaño que fluye lentamente. A esto se le llama ‘fluctuacion de aire’ (ver figura 21). Un fenomeno visual común, por ejemplo, son los vapores de calor.

Figura 21. Influencia de fluctuaciones del aire [12].

Cuando una masa de aire atraviesa el eje óptico del sensor de desplazamiento láser, se produce una ligera desviación en la posición del punto de luz, lo que produce una fluctuación en los valores de la medición. La cantidad de la variación es irregular.

A mayor distancia de medición, mayor será la probabilidad de que una masa de aire cruce el eje óptico. La influencia de las fluctuaciones de aire dificulta la obtención de la resolución estática nominal.

De hecho, en muchos casos, un entorno de medición que satisfaga las especificaciones, requiere condiciones en donde ninguna persona debe entrar ni salir, ni deben producir cambios de temperatura. Existen solo dos métodos para producir este tipo de entorno, estos son:

- Prepare un espacio que sea lo más estrecho posible, y realice la medición con el cabezal sensor y el objeto, dentro de este espacio.

- Sople aire forzado (purga de aire) como se aprecia en la figura 22.

Se puede esperar un efecto, si se observa una desviación mayor a 1 µm del valor nominal.

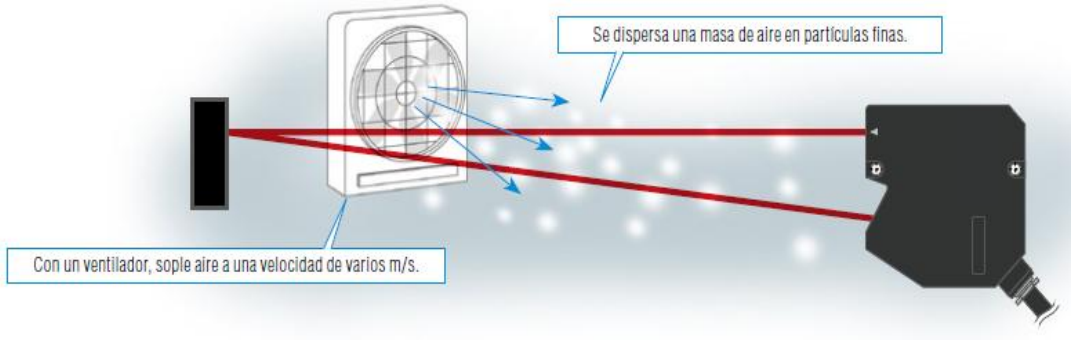


Figura 22. Purga de aire [12].

3.4.2.2. Componentes diminutos de vibración en el sistema de medición

Si la fluctuación del valor de medición es mayor que la resolución estática del sensor de desplazamiento, esto puede deberse a la vibración de la guía de montaje.

Cuando la dirección de la medición de un sensor de desplazamiento no es horizontal, pueden generarse pequeñas vibraciones debido a gente caminando, las cuales se transmiten a la guía de montaje. Se considera que las fluctuaciones en la medición, del orden de 0.1 µm a unos pocos µm, se producen debido a esta fuente de vibración.

Existen dos opciones para resolver este problema:

- Utilizar un filtro pasa bajo.
- Asegurar el sensor y la mesa de medición con una guía de montaje de una sola pieza.

3.4.2.3. Resolución de entrada/salida

Existen dos tipos de señales de salida para obtener la medición de un sensor de desplazamiento: las señales digitales y el voltaje o corriente análoga. Cuando se opta por el voltaje o corriente análoga, las fluctuaciones pueden ser mayores, debido a la influencia de ruido, tal como el de modo común, el de la radiación del dispositivo o el de la fuente de alimentación.

Se pueden realizar tres acciones contra este problema:

- Cambiar la escala analógica para asignar valores de medición más finos para 1mV (ya que este es el menor cambio en la magnitud de entrada que se aprecia en la magnitud de salida).

- Incluir funciones de promediado y filtrado en el dispositivo utilizado para procesar la señal análoga.

- Utilizar cable más grueso y más corto, utilizar cables blindados de dos hilos.

3.4.2.4. Aberraciones ópticas que afectan a l sensor láser de desplazamiento

Una aberración, es la deficiencia óptica de un objetivo que da lugar a imágenes faltas de nitidez o deformadas.

Con un lente ideal sin aberración, el tamaño del punto enfocado en el elemento receptor de luz es siempre pequeño e igual, independientemente de la posición que refleja la luz en el rango de medición, como se muestra en la figura 23.

La precisión del sensor de desplazamiento láser depende del tamaño y la forma del punto enfocado en el elemento receptor de luz. Lo ideal es hacer que el tamaño del punto sea igual en cualquier posición.

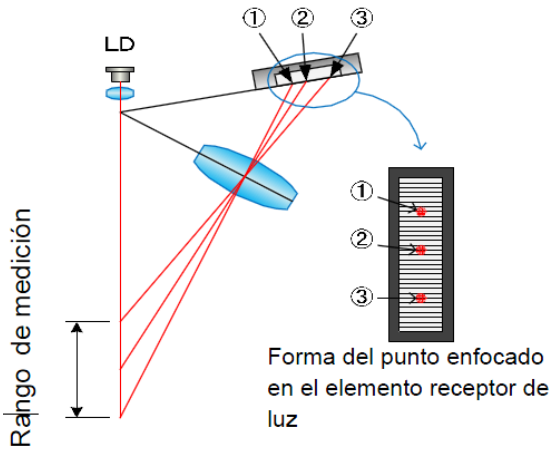


Figura 23. Lente ideal sin aberración [9].

Los siguientes tres tipos de aberraciones de lente pueden afectar a los sensores de desplazamiento láser: Aberración cromática, astigmatismo y curvatura de campo. Esto se aprecia en la figura 24.

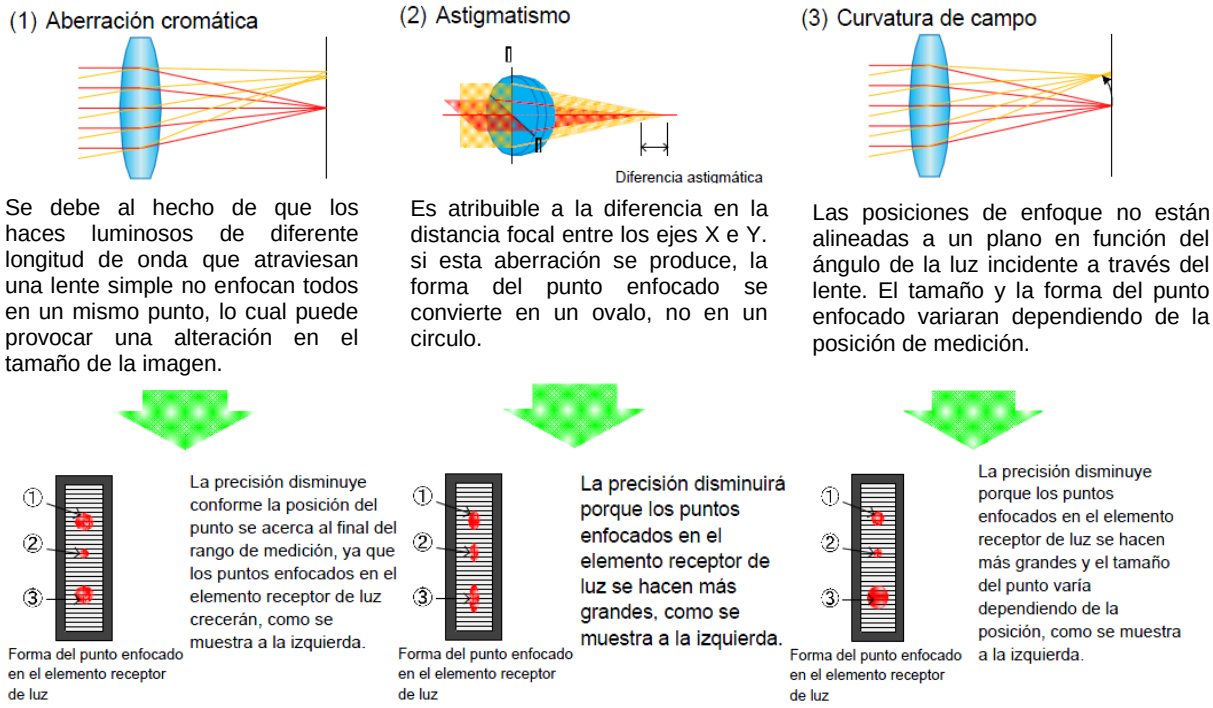


Figura 24. Aberraciones que afectan a los sensores laser de desplazamiento [9].

3.4.2.5. Medidas contra la influencia de las aberraciones

Con un lente esférico simple, es técnicamente difícil suprimir las aberraciones tales como la aberración cromática, el astigmatismo y la curvatura de campo. Por lo tanto, los lentes de los sensores de desplazamiento láser KEYENCE están diseñados para reducir al mínimo la influencia de las aberraciones gracias a la combinación de diferentes sistemas de lentes, como se puede ver en la figura 25. Esto es de gran importancia si se desea obtener una imagen más precisa, ya que en los sistemas formados por varias lentes acopladas la imagen que forma la primera lente actúa como objeto de la segunda lente y así sucesivamente, lo cual genera una mayor convergencia (todos sus puntos se enfocan en un solo lugar y dan origen a una imagen real).

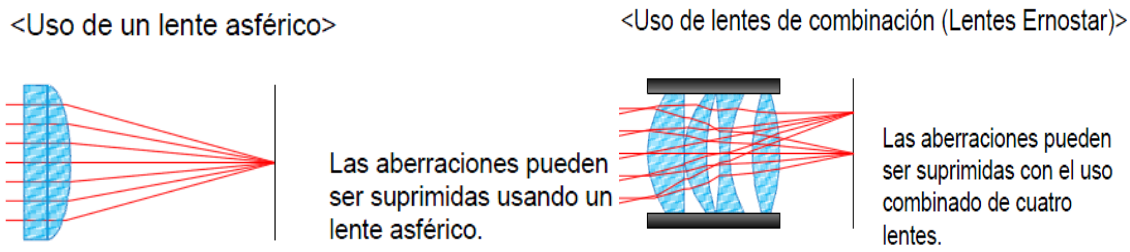


Figura 25. Sistemas de lentes para suprimir las aberraciones [9].

3.4.3. Reflexión lumínica y precisión en la medición

La reflexión de la luz varía en función de las condiciones de la superficie del objeto, tales como el vidrio transparente, superficies tipo espejo, metálicas, de goma o resina.

El fabricante Keyence señala 3 tipos de reflexión [13], las cuales afectan la precisión de la medición del sensor de desplazamiento láser, por las diferencias en las condiciones de luz reflejada (ver figura 26).

- Reflexión especular: si el objeto tiene una superficie tipo espejo o de vidrio, el ángulo de reflexión es igual al ángulo de incidencia.

- Reflexión media: si el objeto posee una superficie metálica o brillante, la intensidad de los componentes de la luz especular reflejada será alta.

- Reflexión difusa: si el objeto es papel blanco o resina blanca, la intensidad de la luz reflejada será igual en todas direcciones.

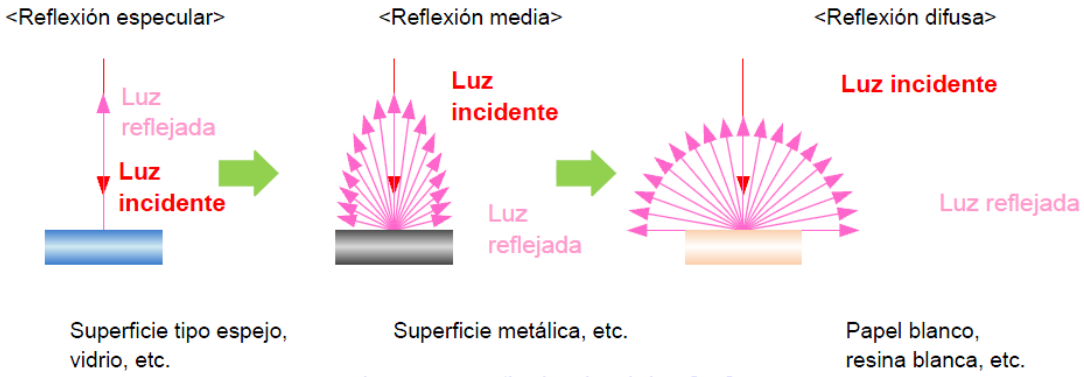


Figura 26 Reflexion luminica [13].

3.4.4. Precisión de la medición según las condiciones de la superficie del objeto

Objeto con reflexión especular: para medir un objeto con reflejo especular (superficie de espejo o de vidrio), debe considerarse cómo montar el sensor, si este se emplea en base al método de medición por triangulación.

Los objetos con reflexión especular pueden medirse, si el cabezal se inclina de tal manera que reciba el reflejo especular, como se puede observar en la figura 27.

Con un objeto de reflexión especular, el sensor proporcionara la exactitud de medición más estable, solo si recibe la luz reflejada con extrema estabilidad. Sin embargo, la característica de ángulo es menor que con otros tipos de objetos.

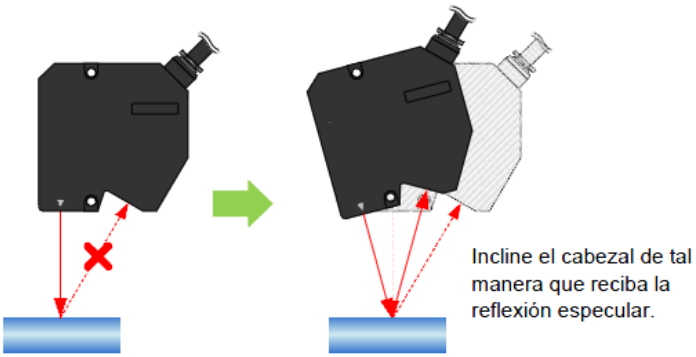


Figura 27. Posicionamiento para medir objetos con reflexión especular [13].

Objeto con reflexión media: en un objeto de reflexión media, las condiciones de la luz reflejada varían en función de las condiciones de la superficie del objeto. Por lo tanto, no se puede describir por regla general cómo se verá afectada la precisión de la medición.

Para poder medir dichos objetos de manera estable, los sensores de desplazamiento láser KEYENCE cuentan con la función ABLE (control de láser activamente balanceado), la cual controla la potencia y tiempo de emisión del láser, a fin de que la intensidad de la luz recibida se mantenga siempre.

Objeto con reflexión difusa: en un objeto con reflexión difusa, la luz reflejada en su superficie es estable, lo que resulta en una precisión de medición estable en comparación con los objetos con reflexión especular.

Capítulo 4. Resultados

4.1. Descripción de la base experimental

Para la realización de este trabajo se diseñó un arreglo experimental compuesto por un sensor láser de desplazamiento marca KEYENCE modelo LK-G-10, cuya distancia de referencia es de 10 mm y tiene un rango de medición de ±1 mm, se alimenta con 24 V DC y consume una corriente de 300mA. También se utilizó un motor a pasos con desplazamiento de 1,8 grados por cada paso del motor, este motor fue controlado mediante una tarjeta pic-step que permite obtener medios pasos, por lo cual se obtuvo una resolución de entrepasos de 0,9 grados, consiguiendo así 400 puntos por cada giro completo de la herramienta de corte. La pic-step fue conectada a una tarjeta SSA-485, que convierte de USB/RS232 a RS485, con lo cual es posible comunicarse con diferentes módulos a través del puerto USB de la PC.

El sensor se encuentra montado sobre una base de aluminio y se sitúa frente a la herramienta, mientras esta se encuentra girando, como se muestra en la figura 28, a una distancia suficiente como para entrar en el rango de medición del sensor, el rango de medición del sensor es de 10mm ±1mm, mas sin embargo hay que tener en cuenta que si se coloca la pieza a 10mm la lectura que mostrará el sensor será 0.000mm, lo que sería un inconveniente al momento de graficar los datos, por lo cual es preferible colocar la herramienta a una distancia diferente, siempre y cuando se encuentre dentro del rango de medición.

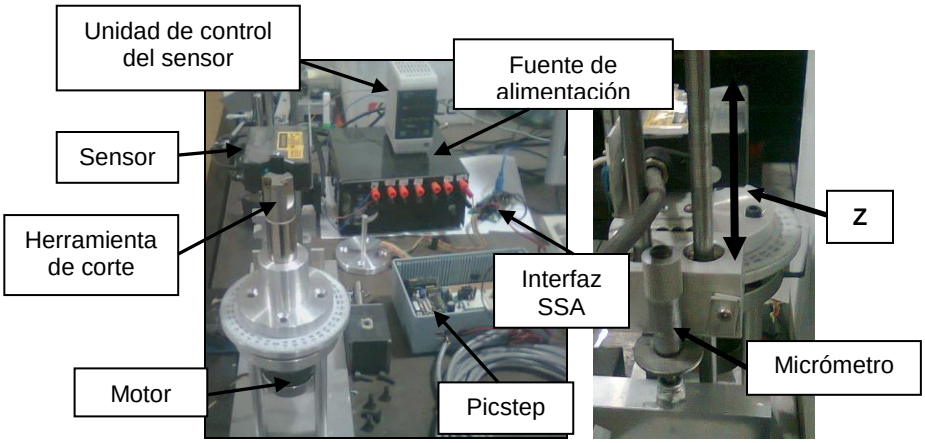


Figura 28. Arreglo Experimental, Para obtener un desplazamiento en el eje Z, detrás del sensor se encuentra un micrómetro, con lo cual se logra avances desde 20µ hasta 1mm.

Un punto que es importante mencionar es que para obtener cada gráfica se realizó una serie normal de mediciones [35].

Una serie normal de mediciones se define como una serie de al menos diez mediciones exentas de error sistemático.

En una serie normal de mediciones es posible que una medición suplementaria dé un valor inferior a la menor de las medidas o superior a la mayor; pero es poco probable, y es aun menos probable que esta medida sea la más próxima al valor exacto.

Un error sistemático es aquel que se produce de igual modo en todas las mediciones que se realizan de una magnitud. Puede estar originado en un defecto del instrumento, en una particularidad del operador o del proceso de medición.

La incertidumbre absoluta es el número que hay que restar al promedio para obtener los limites de los valores posibles, es decir, los valores entre los cuáles la magnitud esta ciertamente comprendida.

Por lo cual en una serie normal de mediciones, la magnitud real está casi seguramente comprendida entre el valor *promedio* ± *incertidumbre absoluta.*

Un ejemplo de una serie normal de mediciones se muestra a continuación, suponga que se toma la temperatura a cierto líquido, obteniéndose los siguientes resultados:

63.4^{o}c, 63.7^{o}c, 63.5^{o}c, 63.4^{o}c, 63.4^{o}c, 63.6^{o}c, 63.6^{o}c, 63.1^{o}c, 63.5^{o}c, 63.2^{o}c

El promedio resultante sería 63.44^{o}c, al redondear quedaría 63.4^{o}c, ahora para obtener la incertidumbre absoluta se toman la medición mayor y la menor, y se calcula como sigue: 63.4 – 63.7 = - 0.3, 63.4 – 63.1 = 0.3, así para este ejemplo se tendría un resultado de 63.4^{o}c ± 0.3.

En la figura 29 se muestra la secuencia seguida para obtener los resultados.

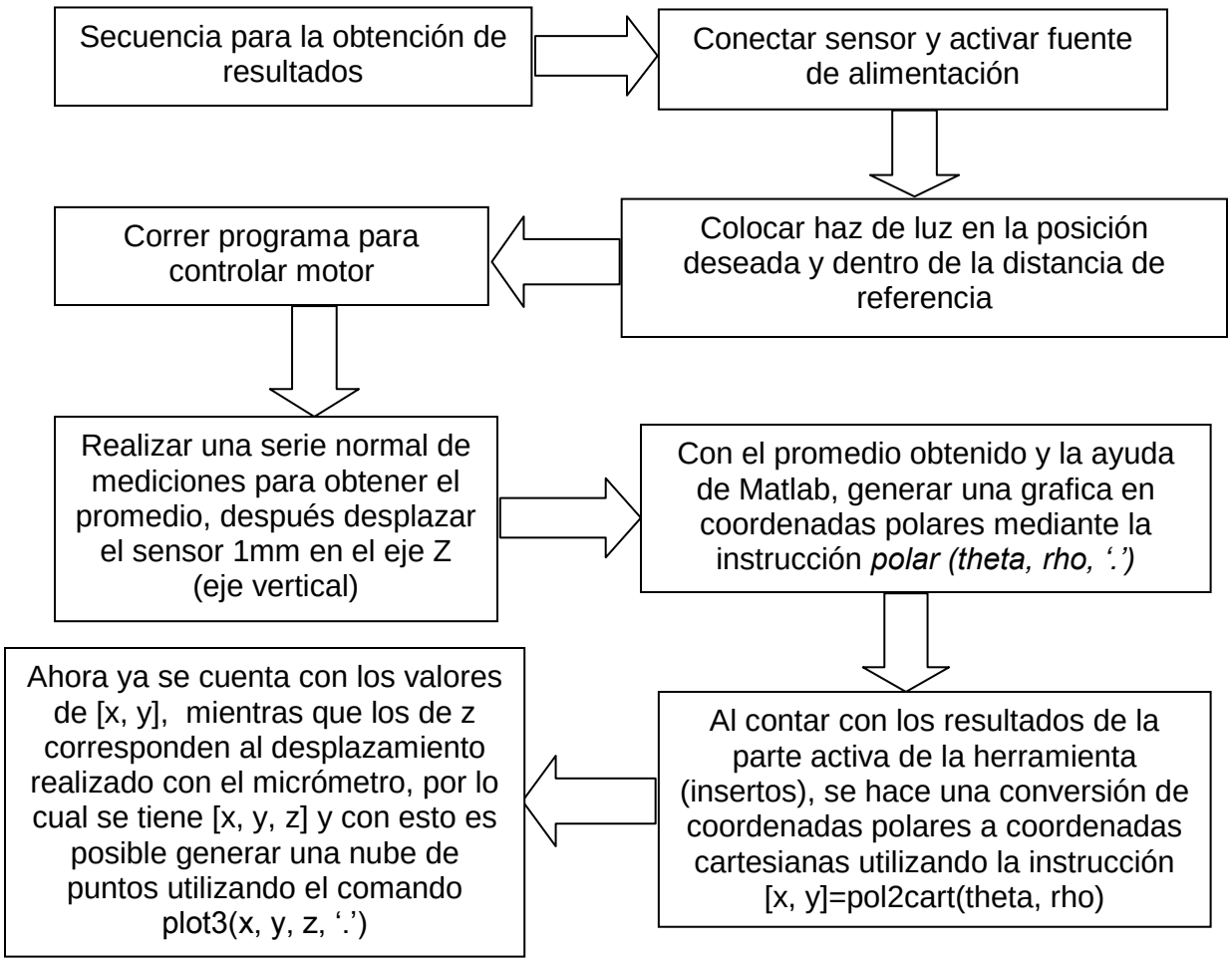


Figura 29. Secuencia de pasos para obtener las mediciones y posteriormente realizar las gráficas.

También es conveniente mencionar que debido al rango de medición del sensor, este solo detecta la superficie más externa de la herramienta de corte, por lo cual las gráficas generadas quedarían como la que se muestra en la figura 30, en un principio esta situación no representaría un problema mayor y solo sería necesario mencionar esta característica y señalar que el desgaste solo fue medido en esta parte , pero al momento de usar Geomagic no era posible obtener un perfil que correspondiera a la herramienta de corte, ya que este software forzosamente rellenaba estos puntos faltantes.

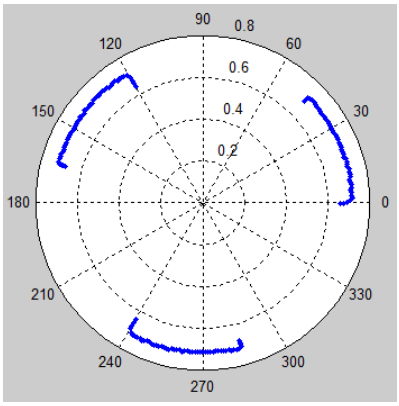


Figura 30. Gráfica sin puntos agregados.

Debido a esta situación se decidió tomar en cuenta lo siguiente.

1.- En algunas partes de la herramienta de corte el sensor láser es *"ciego"* (lugares fuera del rango de medición), por lo tanto la lectura que muestra el sensor es *FFFFFF* y estos puntos no pueden ser graficados.

2.- Se conoce con la posición angular (theta) de cada punto y su distancia respecto al sensor (rho).

Así que para no desperdiciar los puntos que muestran *FFFFFF* se optó por agregar valores que no afectasen las cifras obtenidas mediante el sensor, por lo cual al momento de obtener los datos se observaba cual era el último valor numérico antes de *FFFFFF*, tomando en cuenta este valor se sustituían las *FFFFFF* por valores menores al último dato numérico presentado por el sensor láser, en cuanto a la posición angular se repite el valor de theta del último punto detectado por el sensor.

De esta forma se lograba mejorar la presentación de las graficas como se observa en la figura 31, sin afectar las mediciones.

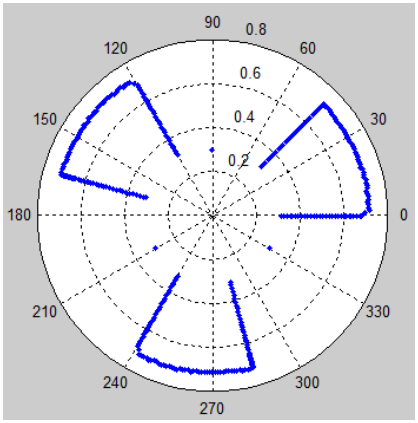


Figura 31. Gráfica con puntos agregados.

Para el caso donde los insertos sobresalen, su utilizo la misma lógica, solo que aquí también se agregaron unos puntos adicionales correspondientes a la parte posterior de los insertos, ver figura 32.

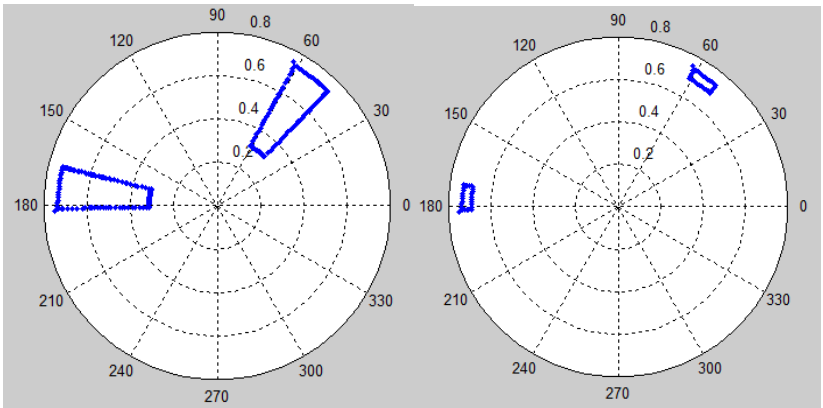


Figura 32. Gráfica de la punta de los insertos con puntos agregados.

4.2. Validación.

Para validar los resultados se opto por realizar una comparación entre los datos arrojados por el sensor láser y algún otro sistema, motivo por el cual se realizo una prueba utilizando el dispositivo Volumix E3D-1010, este está integrado por una cámara de video USB, un sistema mecánico, una computadora y una serie de algoritmos de procesamiento de imágenes, por lo cual se decidió tomar como muestra la parte

cilíndrica de la misma herramienta de corte utilizada en este proyecto, la cual tiene un acabado semi-reflejante y un diámetro de 2.54cm, dicha pieza se puede observar en la figura 33.

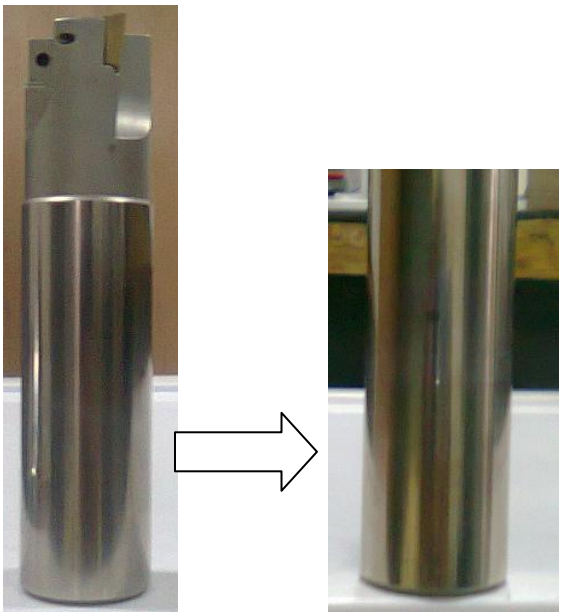


Figura 33. Parte cilíndrica de la herramienta de corte que se utilizó para calcular la redondez.

El objetivo de este experimento era comprobar la redondez de la herramienta de corte, tanto con el sensor láser como con el Volumix E3D-1010.

La redondez se define como: tolerancia bidimensional de forma, la cual describe la variabilidad en la forma y apariencia de un círculo en una vista seccional. Para ello se hizo uso de la siguiente fórmula:

$$Redondez = \frac{4*\pi*área}{perimetro^2} \tag{4.1}$$

Para conocer el área y el perímetro es necesario determinar el centro de gravedad, y para lograrlo se utilizan las siguientes ecuaciones:

$$G_x = \frac{\sum_{i=1}^{N} x_i}{N} \tag{4.2}$$

$$G_y = \frac{\sum_{i=1}^{N} y_i}{N} \tag{4.3}$$

Conociendo estos 2 valores se puede obtener el radio mediante:

$$G_x{}^2 + G_y{}^2 = r^2 \quad (4.4)$$

Ahora para conocer el área y el perímetro se aplica:

$$A = \pi * r^2 \quad (4.5)$$

$$P = 2 * \pi * r \quad (4.6)$$

Así, la primera parte de este experimento consistió en analizar la redondez de la herramienta de corte utilizando el Volumix E3D-1010, el cual es un escáner tridimensional desarrollado en CICATA-IPN unidad Querétaro. Con este método se obtuvieron 18 imágenes, las cuales mediante los algoritmos de dicho dispositivo generan una nube de puntos, como se observa en la figura 34, de esta nube de puntos solo necesitamos los valores correspondientes al contorno, lo cual se ve en la figura 35, a partir de estos puntos se obtienen los valores de [x, y] y con ellos se calcula la redondez, así se tiene que el valor de redondez obtenido con este método fue de 0.9818.

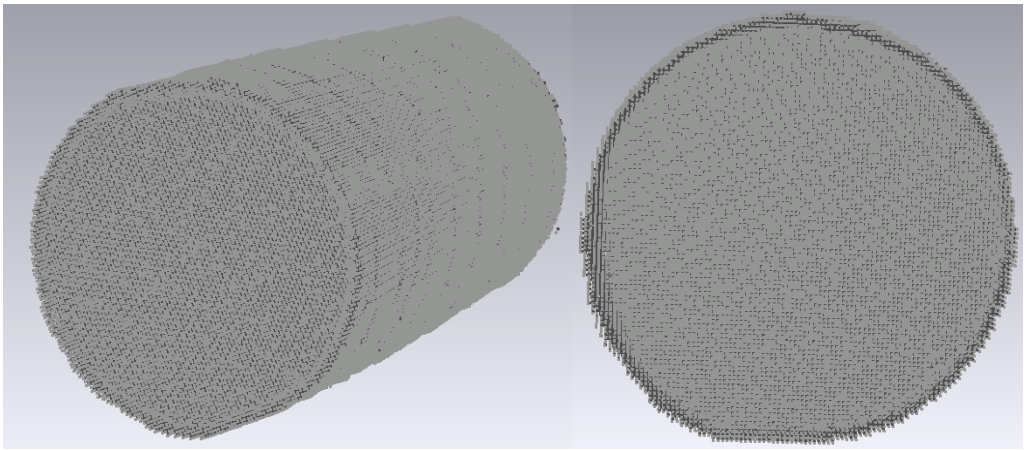


Figura 34. Nube de puntos correspondiente a la parte cilíndrica de la herramienta de corte, generada utilizando el Volumix E3D-1010.

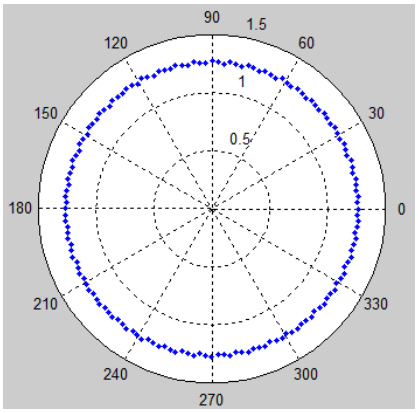


Figura 35. Gráfica del contorno de la herramienta de corte, obtenido mediante Volumix E3D-1010.

Ahora en la segunda parte de este experimento, se procede a calcular la redondez utilizando el sensor láser de desplazamiento, por lo cual se realizan una serie de mediciones en la parte cilíndrica de la herramienta, a continuación se utilizan estos datos para hacer el despliegue gráfico en coordenadas polares que se muestra en la figura 36, acto seguido se procede a obtener los valores de [x, y], una vez hecho esto se calcula la redondez, obteniéndose con este método un valor de 0.9977.

Se observa que los resultados obtenidos son consistentes con los mostrados por Volumix E3D-1010 de esta manera las mediciones obtenidas por el sensor láser están validadas utilizando un sistema que funciona bajo un principio diferente.

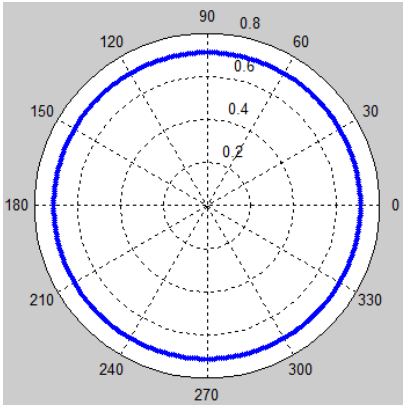


Figura 36. Gráfica en coordenadas polares de la parte cilíndrica de la herramienta de corte, obtenida mediante el sensor láser de desplazamiento.

4.3. Características de los insertos de la herramienta de corte.

Los insertos son herramientas individuales con varios puntos de corte, estos son fijados al porta herramientas con diversos mecanismos de sujeción, siendo el diseño de sujeción por tornillo el método más empleado debido a la facilidad que existe al momento de hacer cambios de inserto. La mayoría de los insertos son afilados a un radio de alrededor de 0.025mm.

La dimensión de los insertos utilizados en estas pruebas son; alto 11.45 mm ±0.05mm, largo 6.55mm ±0.05mm y ancho 3.55mm ±0.05mm, esto se puede observar en la figura 37.

Figura 37. Medidas de los insertos de carburo utilizados en estas pruebas.

4.4. Resultados obtenidos sin ningún inserto en la herramienta.

Después de haber comprobado la efectividad del método mediante la redondez, se procedió a realizar pruebas con la herramienta de corte mientras esta no tenía ningún inserto, como se muestra en la figura 38. Esto con el fin de identificar los posibles inconvenientes que se pudieran presentar en una geometría más compleja, como la de la herramienta de corte usada en este proyecto. Una vez más el desplazamiento en el

eje Z fue de 1mm, por lo cual el punto de inicio del escaneo fue 1mm por debajo de la zona donde deben ir colocados los insertos.

Para facilitar la adquisición de datos se contó con la ayuda de un programa en Visual Basic, la ventana principal de dicho programa se puede observar en la figura 39. Este programa permite visualizar la posición y el valor leído por el sensor, además se puede indicar la cantidad de pasos deseada, en este caso fue de 400, ya que es el valor máximo de pasos que se pueden realizar, esto equivale a un desplazamiento de 0.9° (0.0635mm). La serie de datos generados (valor y posición angular) son guardados para su posterior análisis.

Figura 38. Geometría de la herramienta de corte sin ningún inserto.

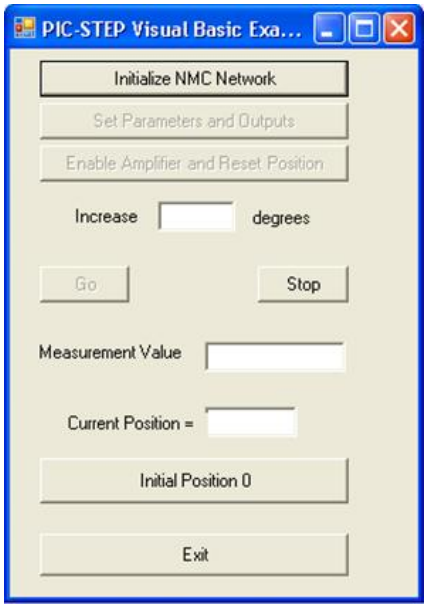
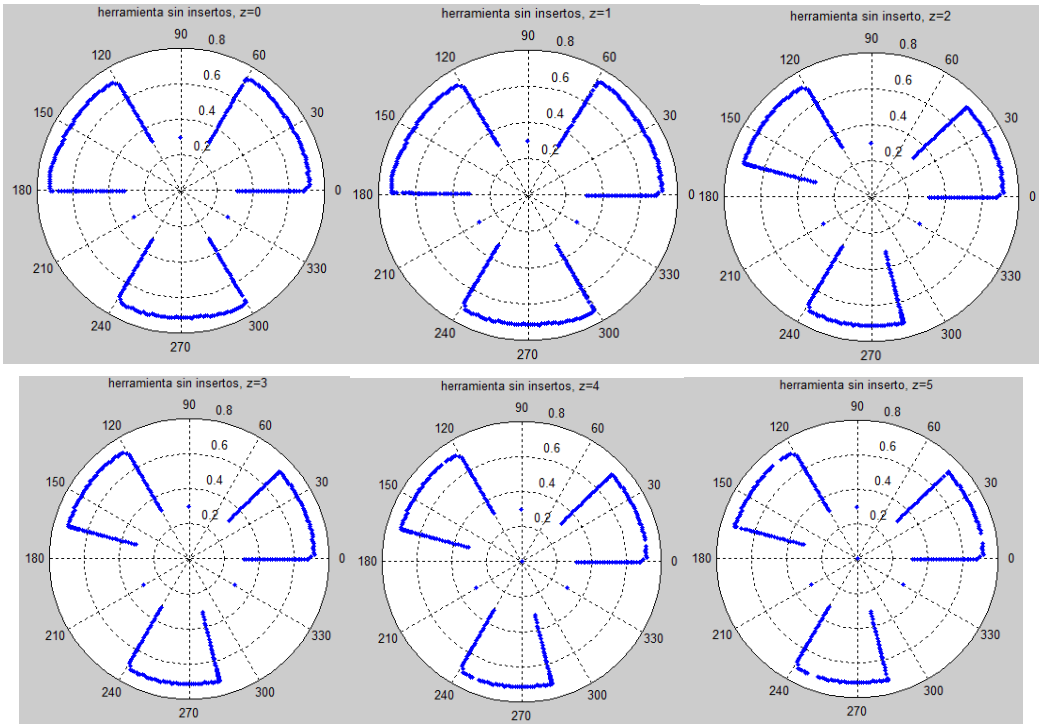


Figura 39. Ventana principal del programa en Visual Basic para la adquisición de datos.

A continuación, en la figura 40 se pueden apreciar la secuencia de gráficas en coordenadas polares obtenidas de la herramienta para cada incremento de z, mientras no había ningún inserto en ella.



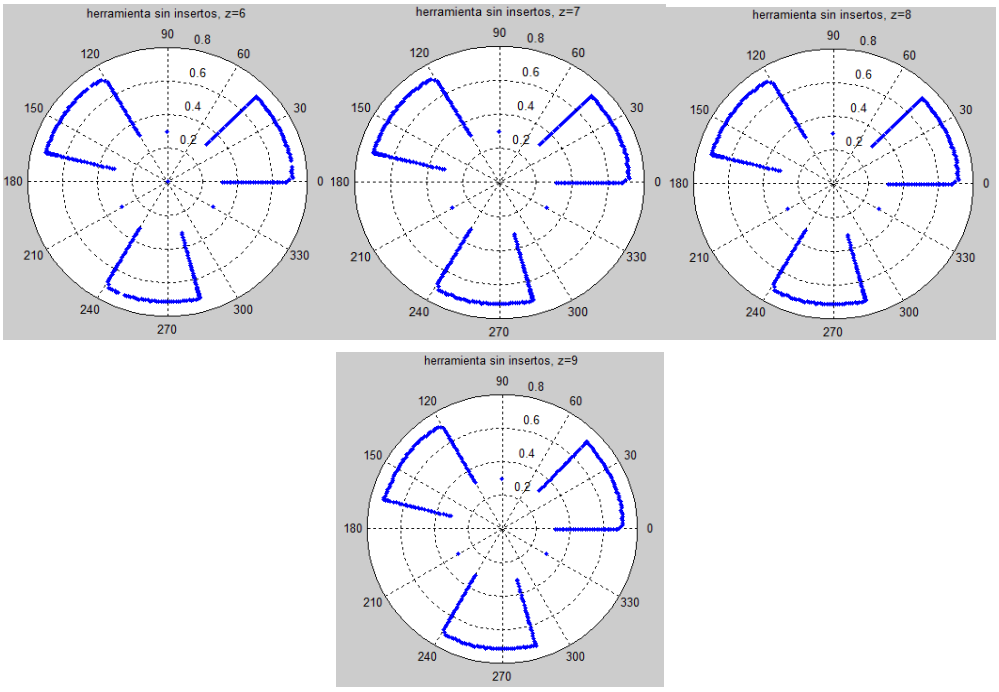


Figura 40. Secuencia de gráficas en coordenadas polares correspondientes a la herramienta de corte sin ningún inserto. Los puntos en azul corresponden a las mediciones obtenidas mediante el sensor láser, los valores en la parte exterior representan la posición angular, la cual va de 0º a 360º, la escala indica que los valores obtenidos se encuentran por debajo de 0.80cm, recordando que la distancia de referencia del sensor es de 10mm (1cm) por lo cual los valores de las mediciones deben de estar dentro de este valor.

Una vez obtenidas las gráficas en coordenadas polares, de nueva cuenta se procede a realizar la conversión a coordenadas cartesianas, para así poder obtener la correspondiente nube de puntos en 3D como se aprecia en la figura 41.

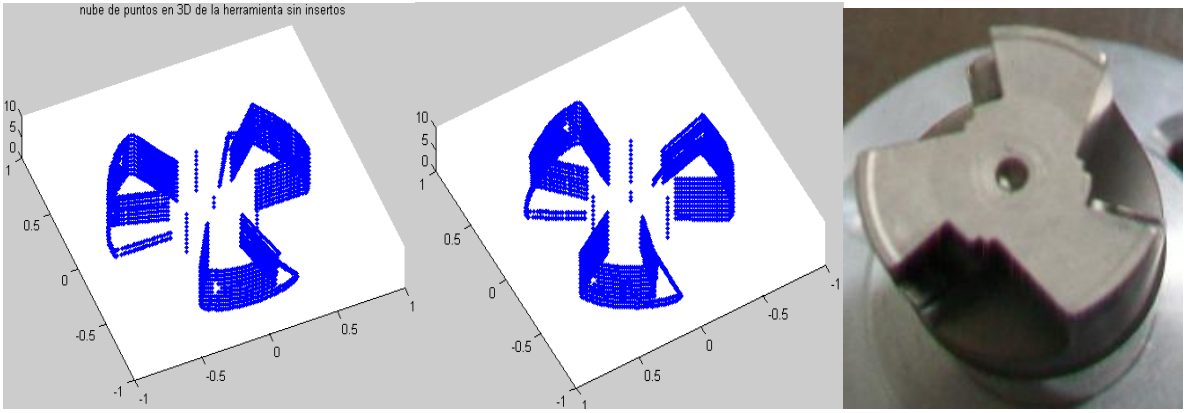


Figura 41. Nube de puntos en 3D correspondiente a la herramienta de corte sin insertos, en esta imagen se muestran 2 vistas de la nube de puntos obtenida y además se presenta el perfil de la herramienta de corte para comprobar la semejanza.

Hasta esta parte se ha obtenido satisfactoriamente una nube de puntos en 3D correspondiente al perfil de la herramienta de corte, pero si se desea no solo obtener una nube de puntos sino que, además se busca contar con una representación gráfica que muestre un objeto '*solido',* la mejor forma de hacerlo es dándole cierta características de textura y mallado a la nube de puntos obtenida, para ello la forma más utilizada es mediante el uso de técnicas de triangulación, este proceso puede ser fácilmente realizado mediante el uso de Geomagic, ya que solo es necesario contar con los valores de X, Y, Z obtenidos al generar la nube de puntos, así en la figura 42 se puede apreciar que la nube generada con Matlab ahora cuenta con un acabado superficial en 3D.

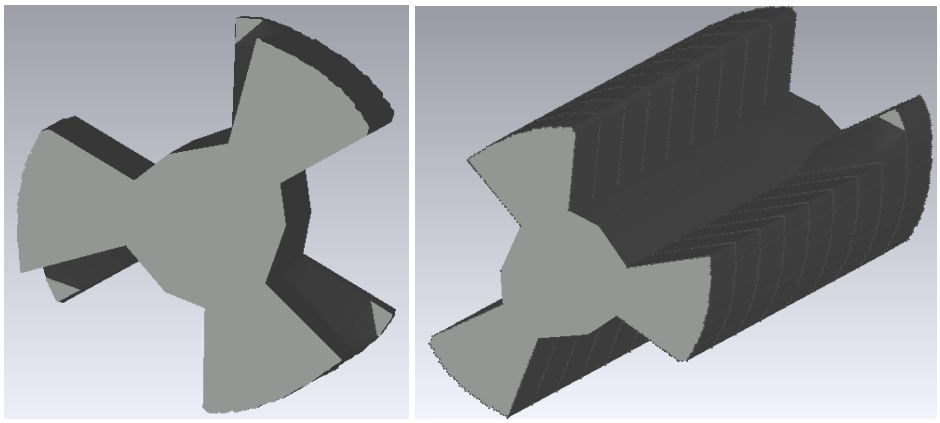


Figura 42. Perfil obtenido en Geomagic a partir de la nube de puntos creada en Matlab.

4.5. Resultados obtenidos con dos insertos nuevos.

Después de haber realizado pruebas a la herramienta de corte sin ningún inserto, se le colocaron 2 insertos completamente nuevos, como se aprecia en la figura 43, como se menciono anteriormente, dichos insertos miden 11.45mm de alto y 3.55mm de ancho. Una vez más el avance en el eje Z fue de 1mm, solo en la punta fue de 0.5mm, el desplazamiento angular fue de 0.9°.

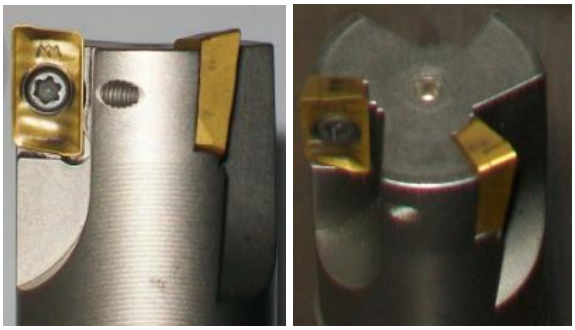
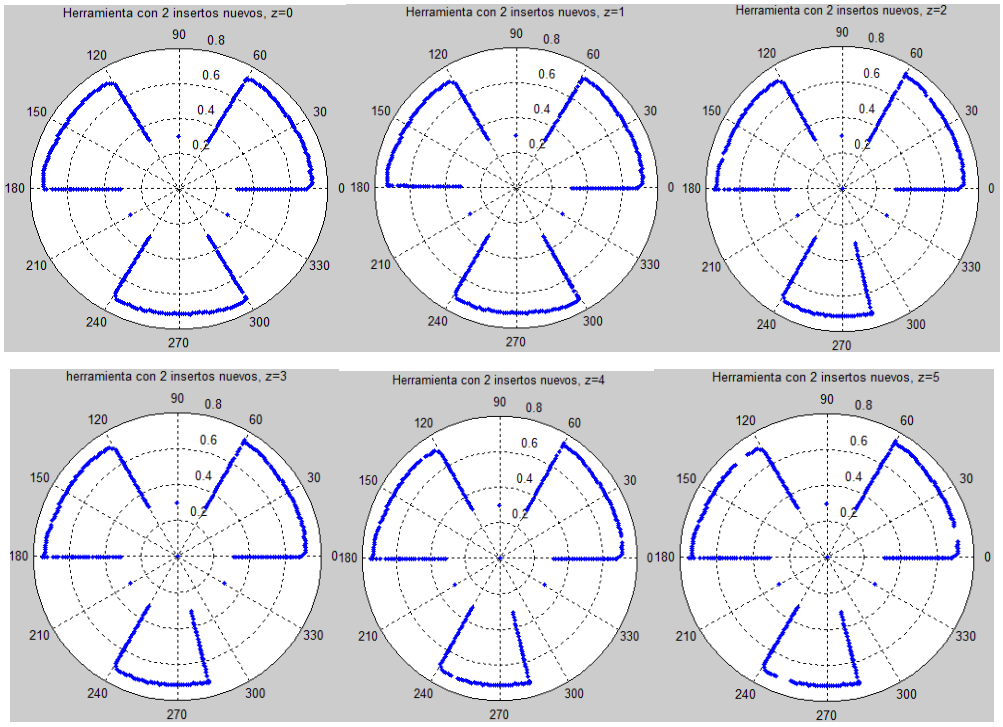


Figura 43. Geometría de la herramienta de corte con 2 insertos nuevos.

Ahora en la figura 44 se observa la secuencia de gráficas en coordenadas polares obtenidas para cada incremento de z en la herramienta de corte, cuando esta tenía dos insertos nuevos.



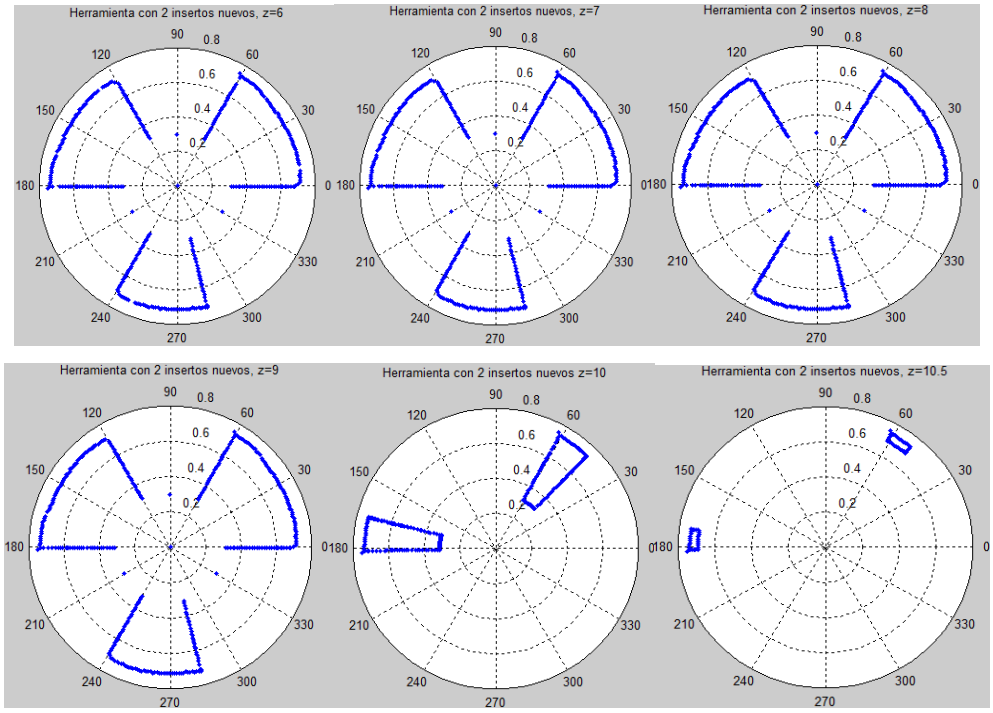


Figura 44. Gráficas en coordenadas polares correspondientes a la herramienta de corte con 2 insertos nuevos. Los puntos en azul corresponden a las mediciones obtenidas mediante el sensor láser, los valores en la parte exterior representan la posición angular, la cual va de 0º a 360º, la escala indica que los valores obtenidos se encuentran por debajo de 0.80cm.

Ya que se cuenta con las gráficas en coordenadas polares, una vez más se procede a realizar la conversión a coordenadas cartesianas y obtener una nube de puntos en 3D, la gráfica obtenida se puede observar en la figura 45. Igual que en el caso anterior, se pueden utilizar los datos obtenidos para obtener un perfil en Geomagic, como se muestra en la figura 46.

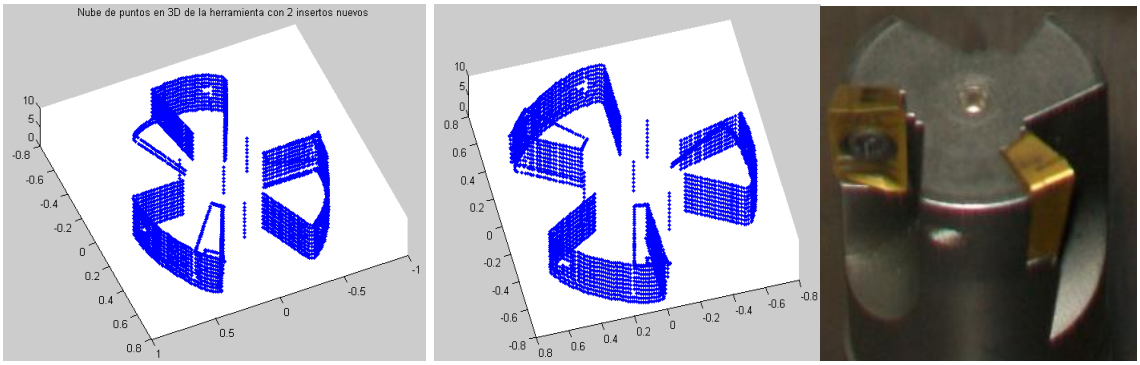


Figura 45. Nube de puntos en 3D donde se puede apreciar el filo de los 2 insertos nuevos.

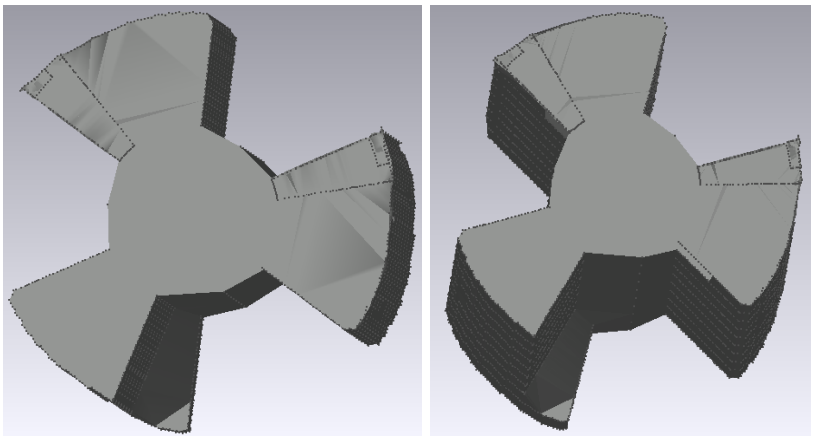


Figura 46. Perfil obtenido en Geomagic donde se observan los 2 insertos nuevos en la herramienta.

4.6. Resultados obtenidos con un inserto nuevo y otro desgastado.

Finalmente, las últimas pruebas que se le realizaron a la herramienta de corte, fueron cuando esta tenía un inserto nuevo y otro desgastado, la geometría de la herramienta de corte para este caso se puede apreciar en la figura 47, mientras que los resultados obtenidos se pueden observar en la figura 48.

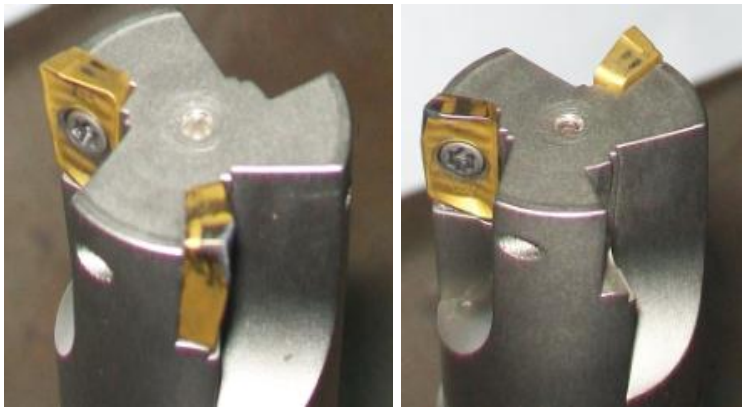


Figura 47. Geometría de la herramienta de corte con un inserto nuevo y otro desgastado.

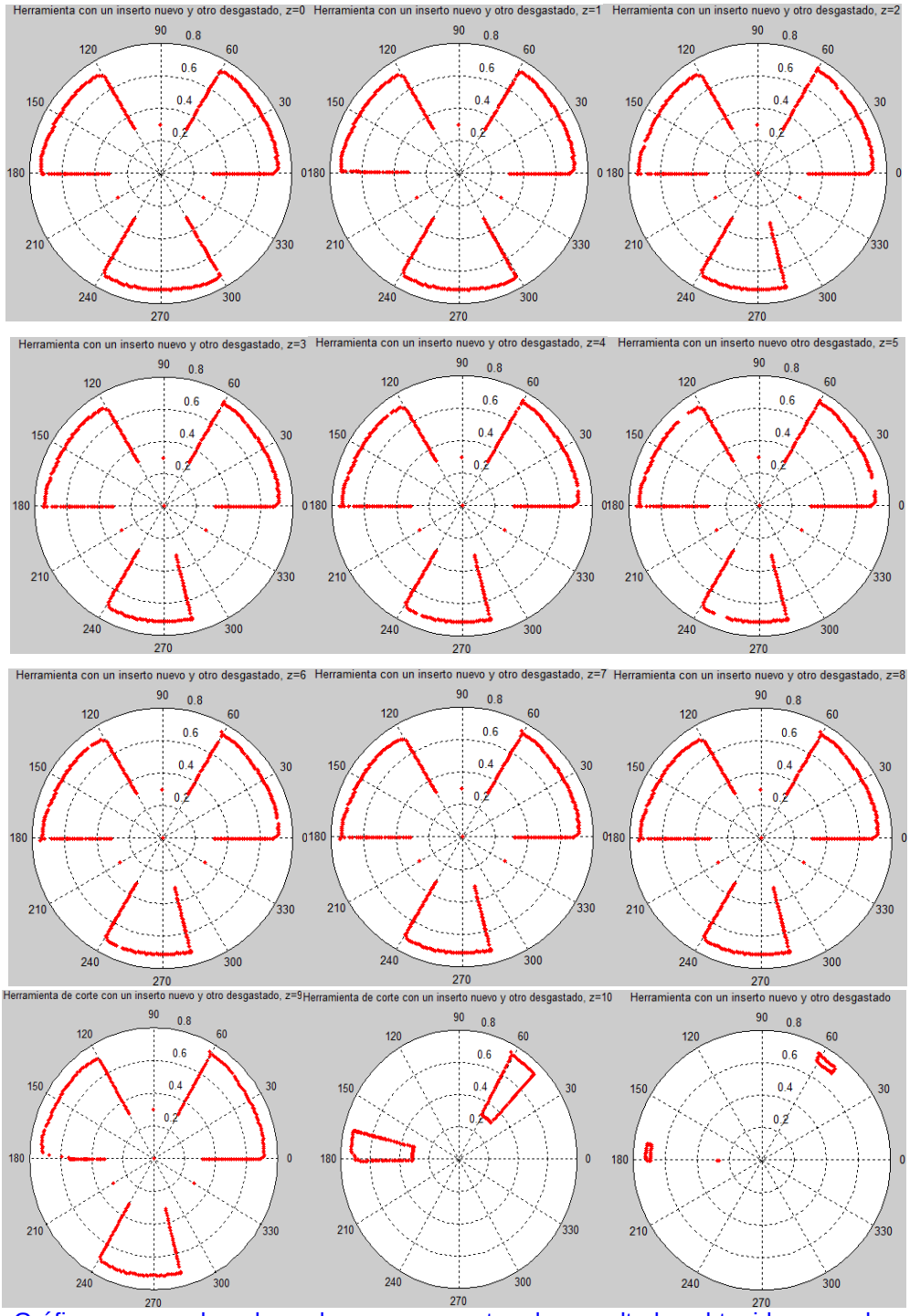


Figura 48. Gráficas en coordenadas polares que muestran los resultados obtenidos cuando se tiene un inserto nuevo y otro desgastado. Para este caso se utilizaron puntos en rojo para diferenciar estos resultados de las demás pruebas, estos puntos corresponden a las mediciones obtenidas mediante el sensor láser, los valores en la parte exterior representan la posición angular, la cual va de 0º a 360º, la escala indica que los valores obtenidos se encuentran por debajo de 0.80cm. Claramente se observa el inserto desgastado a partir de la posición z=9mm y hasta 10.5mm.

De nueva cuenta se procede a realizar la conversión a coordenadas cartesianas y obtener una nube de puntos en 3D, dicha gráfica se puede observar en la figura 49. Igual que en el caso anterior, se pueden utilizar los datos obtenidos para obtener un perfil en Geomagic, como se muestra en la figura 50.

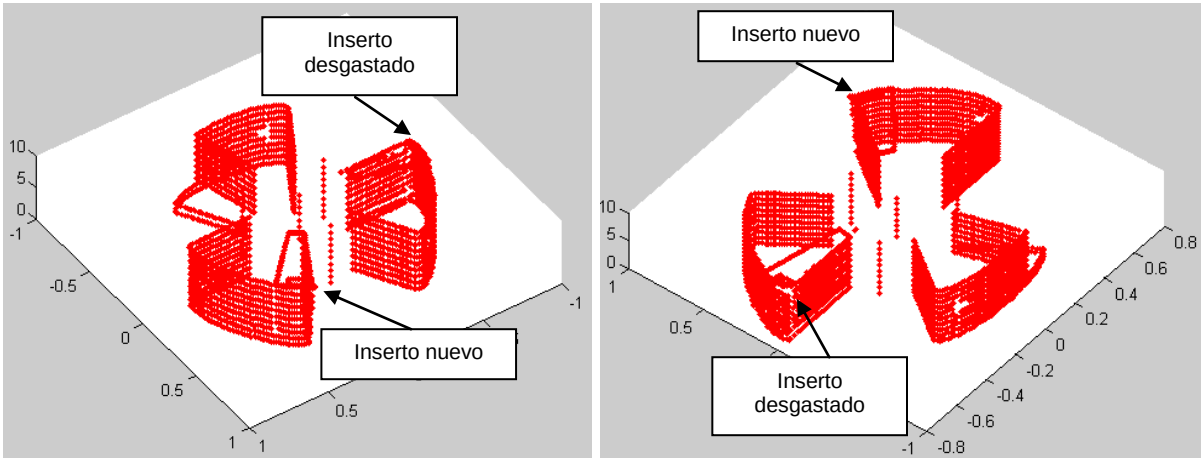


Figura 49. Nube de puntos en 3D para el caso donde se encuentra un inserto nuevo y otro desgastado.

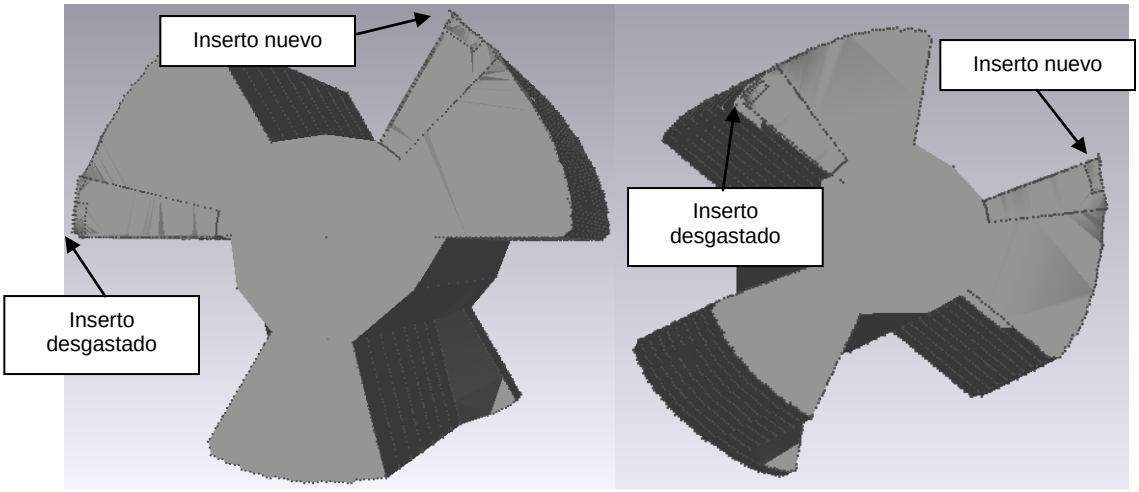


Figura 50. Perfil obtenido en Geomagic donde se observa un inserto desgastado en la herramienta.

Como se pudo apreciar en la figura 48 la parte más dañada del inserto que fue desgastado se encuentra en las alturas correspondientes a z=9mm, z=10mm y z=10.5mm, motivo por el cual en la figura 51 se observan las gráficas correspondientes a estas alturas, con un acercamiento y solo al área correspondiente al inserto desgastado, en azul se muestra los valores de las mediciones cuando el inserto se

encontraba sin desgaste, mientras que en rojo se presentan los valores de distancia medidos cuando el inserto fue desgastado. Además se observa que el filo de la herramienta de corte dejo de existir.

En la tabla 1 se muestran los valores de las mediciones de distancia obtenidos por el sensor láser, estos valores fueron los obtenidos en el inserto antes y después del desgaste. Es preciso recordar que una herramienta de corte se considera desgastada cuando en algún punto del inserto se presenta un desgaste mayor o igual a 0.3mm, más sin embargo el fabricante de la herramienta recomienda cambiarla al momento de detectar un desgaste de 0.2mm, por lo cual es esta tabla se marcan en rojo los valores cuyo resultado de restar *Valores de distancia medidos sin desgaste - Valores de distancia medidos con desgaste* superaron los 0.2mm.

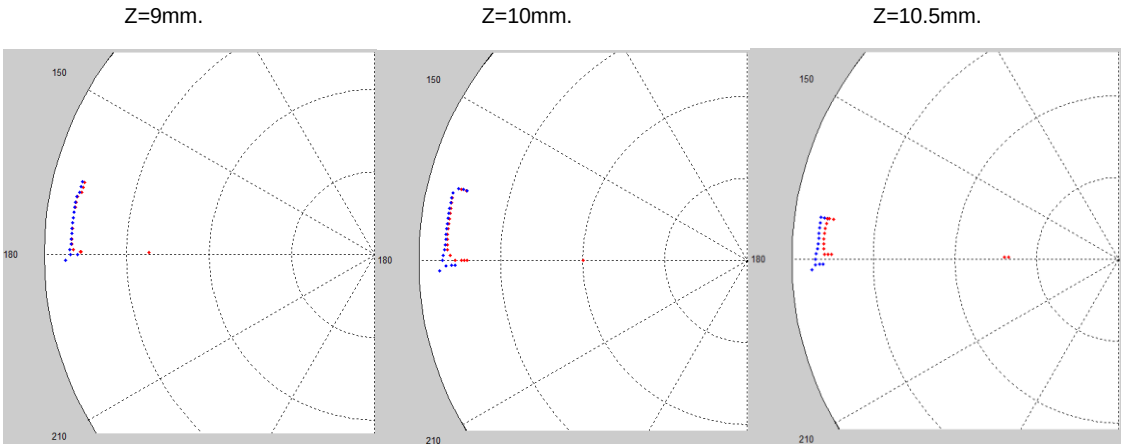


Figura 51. Gráfica que muestra los resultados de las mediciones de distancia en el inserto sin desgaste (puntos azules) y a su vez los resultados del inserto desgastado (puntos rojos) en z=9mm, z=10mm, z=10.5mm.

z=9			z=10			z=10.5		
Valores de distancia medidos sin desgaste	Valores de distancia medidos con desgaste	Desgaste	Valores de distancia medidos sin desgaste	Valores de distancia medidos con desgaste	Desgaste	Valores de distancia medidos sin desgaste	Valores de distancia medidos con desgaste	Desgaste
0.7232mm ± 0.0002	0.7225mm ± 0.0002	0.0007mm	0.7348mm ± 0.0002	0.7342mm ± 0.0002	0.0006mm			
0.7243mm ± 0.0002	0.7238mm ± 0.0001	0.0005mm	0.7354mm ± 0.0002	0.7345mm ± 0.0001	0.0009mm			
0.7242mm ± 0.0001	0.7242mm ± 0.0001	0mm	0.7358mm ±0.0001	0.7355mm ±0.0001	0.0003mm	0.7349mm ± 0.0002	0.7191mm ± 0.0001	0.0158mm
0.7223mm ± 0.0002	0.7321mm ± 0.0003	0.0002mm	0.7359mm ±0.0002	0.7348mm ±0.0002	0.0011mm	0.7352mm ± 0.0001	0.7201mm ± 0.0001	0.0151mm
0.7231mm ± 0.0001	0.7329mm ± 0.0001	0.0002mm	0.7351mm ± 0.0001	0.733mm ± 0.0001	0.0021mm	0.7354mm ± 0.0001	0.7212mm ± 0.0002	0.0142mm
0.7339mm ±0.0003	0.7337mm ± 0.0002	0.0002mm	0.7352mm ± 0.0001	0.7321mm ± 0.0002	0.0031mm	0.7351mm ± 0.0002	0.7213mm ± 0.0001	0.0138mm
0.7355mm ±0.0002	0.7350mm ± 0.0002	0.0005mm	0.7354mm ± 0.0001	0.7319mm ± 0.0001	0.0035mm	0.7357mm ± 0.0002	0.722mm ± 0.0003	0.0137mm
0.7390mm ±0.0003	0.7353mm ± 0.0001	0.0037mm	0.7351mm ± 0.0002	0.7319mm ± 0.0003	0.0032m	0.7366mm ± 0.0001	0.722mm ± 0.0002	0.0146mm
0.7396mm ±0.0001	0.7344mm ± 0.0001	0.0052mm	0.7355mm ± 0.0003	0.7315mm ± 0.0001	0.004mm	0.7407mm ± 0.0003	0.7221mm ± 0.0001	0.0186mm
0.7393mm ±0.0001	0.7345mm ± 0.0001	0.0048mm	0.7354mm ± 0.0003	0.732mm ± 0.0002	0.0034mm	0.7422mm ± 0.0002	0.7201mm ± 0.0001	0.0221mm
0.7354mm ±0.0001	0.7342mm ± 0.0003	0.0153mm	0.7354mm ± 0.0001	0.7318mm ± 0.0002	0.0036mm	0.7423mm ± 0.0001	0.7009mm ± 0.0001	0.0414mm
0.7353mm ±0.0003	0.7341mm ± 0.0002	0.0142mm	0.7352mm ± 0.0002	0.7311mm ± 0.0001	0.0041mm	0.7499mm ± 0.0001	0.2789mm ± 0.0002	0.471mm
0.7354mm ±0.0002	0.734mm ± 0.0002	0.0146mm	0.7355mm ± 0.0001	0.7255mm ± 0.0003	0.01mm	0.7321mm ± 0.0001	0.2682mm ± 0.0002	0.4639mm
0.7354mm ±0.0002	0.7298mm ± 0.0003	0.0176mm	0.7365mm ± 0.0001	0.7096mm ± 0.0001	0.0269mm	0.7231mm ± 0.0002	0.7141mm ± 0.0001	0.009mm
0.7352mm ±0.0001	0.7125mm ± 0.0001	0.0608mm	0.7405mm ± 0.0002	0.7022mm ± 0.0001	0.0383mm	0.7153mm ± 0.0001	0.7123mm ± 0.0003	0.003mm
0.7361mm ±0.0002	0.7110mm ± 0.0001	0.1443mm	0.7417mm ± 0.0002	0.7007mm ± 0.0001	0.041mm			
0.7491mm ±0.0001	0.5462mm ± 0.0002	0.2029mm	0.7497mm ± 0.0003	0.3989mm ± 0.0002	0.3508mm			

Tabla 1. Valores correspondientes al inserto que fue desgastado (antes y después de sufrir el desgaste), los resultados son mostrados en milímetros y son el resultado de una serie normal de mediciones, la medición en rojo indica un valor crítico de desgaste.

Es importante hacer notar que en la tabla 1 solo se muestran los resultados de las mediciones hechas al inserto que fue desgastado, estos valores son los que generan los perfiles de la figura 48 y son exclusivamente los obtenidos mediante el sensor láser, así que en ella no se encuentran los valores que fueron agregados para rellenar los puntos donde el sensor no obtenía lecturas.

4.7. Discusión y trabajos futuros.

A lo largo de este proyecto se realizaron varias pruebas con diferentes tipos de herramienta de corte (brocas de diversos diámetros e insertos de diferentes materiales) en distintos dispositivos, todo ello para observar el comportamiento del sensor láser bajo distintas condiciones de trabajo y así poder comprender y/o analizar los posibles inconvenientes que se pudieran presentar al utilizar este sensor en una aplicación como la del presente proyecto donde no solo se busca comparar las mediciones obtenidas con el sensor, sino que también con los valores obtenidos de dichas mediciones se busca generar una serie de gráficas en coordenadas polares para posteriormente obtener una nube de puntos que represente el perfil de la herramienta de corte. Hay que recordar que los principales usos de los sensores láser de

desplazamiento son por ejemplo detectar rugosidades en laminas de metal o algún otro material, para determinar la altura a la que se encuentra determinado objeto, medir el espesor e inclusive para posicionamiento de alguna parte.

En uno de los primeros experimentos se monto el sensor sobre un taladro fresador, como se muestra en la figura 52, el objetivo principal de esta prueba era verificar si el sensor era capaz de obtener datos mientras la broca se encontraba girando

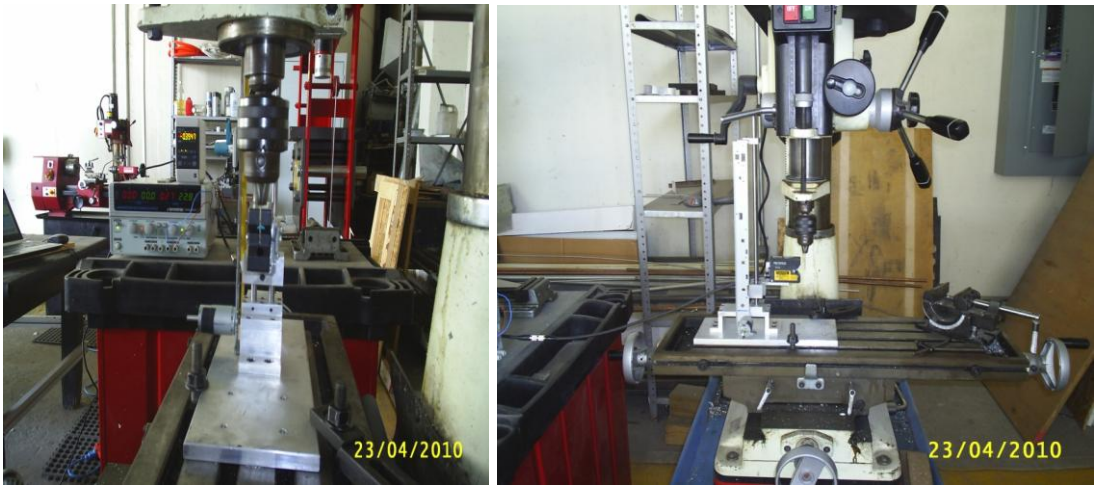


Figura 52. Montaje del sensor láser en un taladro fresador.

De esta prueba se sacaron importantes conclusiones que fueron determinantes para la realización de este proyecto, las cuales se mencionan a continuación:

1. El husillo del taladro tenía demasiado juego mecánico, lo cual afectaba considerablemente los valores de las mediciones, además había que considerar el hecho de que era necesario colocar el sensor a una distancia de por lo menos 10mm la broca y debido al juego mecánico era un poco riesgoso para el sensor.
2. El sensor era colocado sobre la bancada del taladro, por lo cual se veía afectado por la vibración de la máquina.
3. A pesar de trabajar a distintas revoluciones (450, 820, 1200) el sensor fue capaz de realizar mediciones a la broca.

El siguiente paso fue realizar las pruebas en algún dispositivo que no tuviera juego mecánico y en el cual la vibración de la maquina no fuera factor considerable que

alterase los resultados, motivo por el cual se decidió realizar las pruebas en un pequeña taladro de mano (mototool), como se aprecia en la figura 53.

Figura 53. Arreglo experimental utilizando un mototool como elemento que simulase a una máquina herramienta, pero sin los problemas de vibración y juego mecánico que esta pudiera presentar.

La realización de las pruebas con el mototool mejoraron considerablemente las mediciones del sensor, pero aquí había dos grandes inconvenientes, el primero era que el tamaño de las brocas a utilizar era considerablemente limitado y el segundo era que con este dispositivo solo se pueden utilizar brocas de diámetros menores a 1/16 de pulgada.

Después de analizar los resultados obtenidos con ambas pruebas se tomaron las siguientes consideraciones:

1. Evitar en lo posible el juego mecánico y la vibración en la máquina herramienta.
2. Utilizar alguna herramienta de corte con mayor aplicación en los procesos de maquinado para darle una mayor relevancia a este proyecto.
3. Ante la falta de un centro de maquinados o CNC en la institución, desarrollar un dispositivo en el cual pudiera girar la herramienta de corte, mientras el sensor realiza un escaneo a la herramienta.

Es así como se toma la decisión de utilizar una herramienta de corte de tres insertos utilizada en operaciones de fresado y además diseñar un dispositivo donde esta pudiera ser montada junto con el sensor láser pero de manera tal que el motor no generará algún tipo de vibración sobre el sensor láser.

Otro punto a considerar fue el referente a la comparación, en un principio se consideró utilizar un vernier para comparar los resultados obtenidos mediante el sensor, la gran problemática con esto fue que la resolución del vernier es menor a la que presenta el sensor láser, motivo por el cual no se continuo con estas pruebas, además al momento de realizar la medición con el vernier no se sabe a qué punto corresponda de los tomados con el sensor láser. Más sin embargo en la figura 54 se muestra una imagen que corresponde al desgaste medido con el vernier en lo que vendría siendo z=10.5mm, en esta imagen se observa que existe un desgaste de 0.46mm, el cual comparado con los valores obtenidos mediante el sensor en la posición z=10.5mm (como se puede apreciar en la tabla 2) es muy similar a los puntos señalados en rojo.

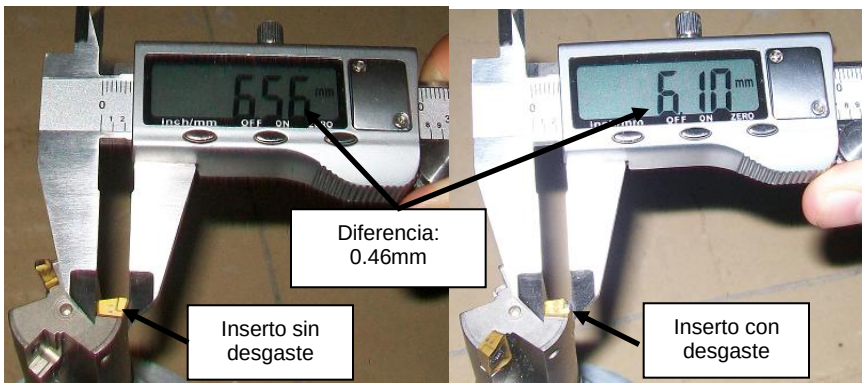


Figura 54. Desgaste medido con un Vernier en zona z=10.5.

z=10.5		
Valores de distancia medidos sin desgaste	Valores de distancia medidos con desgaste	Desgaste
0.7349mm ± 0.0002	0.7191mm ± 0.0001	0.0158mm
0.7352mm ± 0.0001	0.7201mm ± 0.0001	0.0151mm
0.7354mm ± 0.0001	0.7212mm ± 0.0002	0.0142mm
0.7351mm ± 0.0002	0.7213mm ± 0.0001	0.0138mm
0.7357mm ± 0.0002	0.722mm ± 0.0003	0.0137mm
0.7366mm ± 0.0001	0.722mm ± 0.0002	0.0146mm
0.7407mm ± 0.0003	0.7221mm ± 0.0001	0.0186mm
0.7422mm ± 0.0002	0.7201mm ± 0.0001	0.0221mm
0.7423mm ± 0.0001	0.7009mm ± 0.0001	0.0414mm
0.7499mm ± 0.0001	0.2789mm ± 0.0002	0.471mm
0.7321mm ± 0.0001	0.2682mm ± 0.0002	0.4639mm
0.7231mm ± 0.0002	0.7141mm ± 0.0001	0.009mm
0.7153mm ± 0.0001	0.7123mm ± 0.0003	0.003mm

Tabla 2. Valores obtenidos con el sensor láser correspondientes al inserto que fue desgastado (antes y después de sufrir el desgaste) en zona z=10.5. El valor en rojo es comparable al medido manualmente con el vernier.

Otros puntos a considerar fueron los referentes al sensor láser y a la geometría de la herramienta de corte, ya que debido al rango de medición del sensor, y a la forma de la herramienta pero sobre todo de los insertos, había puntos donde no se lograba obtener una medición, principalmente en las cara frontal y superior del inserto, la figura 55 muestra cuales son estas caras, la solución a este problema se deja a trabajos futuros en el tema.

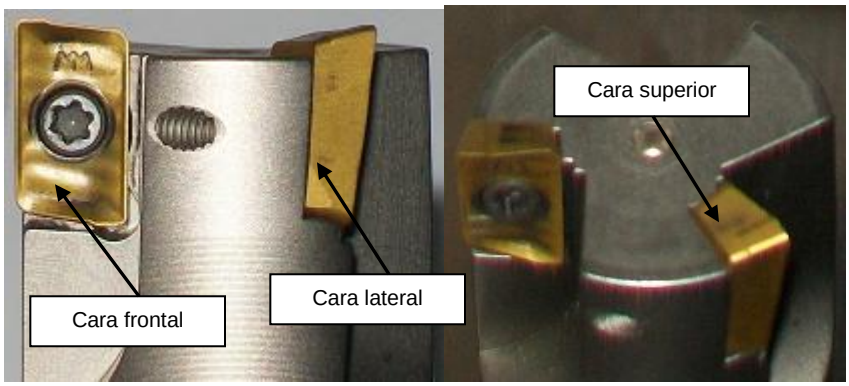


Figura 55. Caras de los insertos.

Capitulo 5 Conclusiones.

El problema de determinar el desgaste con algún sistema de medición indirecto depende de múltiples variables y no es recomendable proponer una solución analítica, así el método propuesto en este trabajo, presenta una solución más sencilla que evita enfrentarse a las complejidades de la solución de un método teórico.

Además, aplicando esta técnica no necesariamente se tienen que manejar los valores de los parámetros de corte a niveles bajos como lo recomiendan los fabricantes de herramientas para garantizar e inclusive mejorar la vida útil.

Esto quiere decir que no se aprovecha eficientemente la herramienta de corte, ya que una herramienta diseñada para trabajar cierta cantidad de tiempo a determinada profundidad y velocidad de corte termina siendo utilizada para maquinar a parámetros menores a los especificados, esto con el fin de asegurar que su vida útil será la señalada por el fabricante, lo cual ocasiona retrasos o tiempos de maquinado más largos.

Hasta aquí se ha presentado un método directo para determinar la detección fuera de línea del desgaste de una herramienta de corte. El sensor empleado proporciona mediciones de mejor calidad del desgaste que los métodos indirectos.

Además el método desarrollado en este proyecto tiene la capacidad de reconstruir el perfil de la herramienta de corte, de esta forma brinda una medición rápida y suficientemente precisa del desgaste comparado con los métodos indirectos y las recomendaciones de los fabricantes de herramientas de corte, que se basan principalmente en datos estadísticos dependientes de variables ajenas a la herramienta y que pueden sufrir diversas alteraciones que se verán reflejadas en la calidad y exactitud de las mediciones del desgaste.

Como trabajos futuros se podría implementar este sistema en una máquina CNC, donde en un principio se realice un escaneo a la herramienta estando está en su posición de inicio, se guarden los datos generados por este escaneo y acto seguido se proceda a maquinar, después de un tiempo regresar la herramienta a su posición inicial para ser escaneada de nuevo y comparar los datos con los guardados anteriormente, si no se detecta algún punto con desgaste mayor al especificado continuar con el proceso de maquinado y repetir la operación de chequeo descrita, por el contrario si se llegase a detectar un desgaste considerable cambiar la herramienta de corte y repetir el procedimiento.

Esta técnica también podría aplicarse para resolver problemas de detección en línea de fallas en placas de metal, así como en la supervisión de acabados superficiales.

Por otro lado, este sensor podría ser adaptado a algún sistema Mecatrónico o brazo robot, para su posterior comercialización, ya que mediante la técnica aplicada en este trabajo se observo que piezas pequeñas cuyas medidas se encuentren dentro del rango de medición del sensor, pueden ser escaneadas y a partir de los datos obtenidos se logra calcular el área y/o el volumen de la pieza con un error aproximado del 7.6%

Referencias

[1] J. Antonio Rodríguez Tirado, Jorge Adalberto Huerta Rúelas. Inspección del acabado superficial para procesos de rectificado y fresado mediante un esparcímetro de luz láser. Mayo 2009.

[2] E. Castillo Castañeda. *On line wear detection of milling tools using a Displacement Fiber Optic Sensor*. Journal of Applied Research and Technology. Vol. 1 Nº 2. July 2003.

[3] Pedro José Arrazola Arriola, Iván Gallego, P. Aristimuño, Rafael Lizarralde. Detección de rotura de herramientas en el microfresado mediante nuevos sistemas de monitorizado. IMHE: Información de máquinas-herramienta, equipos y accesorios, ISSN 0210-1777, Nº 335, págs. 63-85, 2007.

[4] Mingjun Chen; Dan Li; Chengbin Jiang. *On-line Measurement of Tool Wear Using Laser-CCD in precision Cutting Process*. Harbin Institute of Technology. Octubre 2001.

[5] KEYENCE, Modelo LK-G Manual del usuario.
http://www.keyence.com.mx/dwn/lkg_man_kmx.pdf

[6] Herramental Monterrey, http://www.mx.all.biz/g883/

[7] http://www.geocities.com/ing_ricardo_belon_cadcam_cnc/apunte7.doc

[8] http://www.sensorland.com/HowPage056.html

[9] KEYENCE, http://www.keyence.com.mx/dwn/measure_optical_labo2_kmx.pdf

[10] KEYENCE,
http://www.keyence.com.mx/products/measure/laser/lkg/lkg_features_1.php

[11] KEYENCE,
http://www.bitmakers.com/automatizacion_categorias_detalle.php?p=205&s=2

[12] KEYENCE, http://www.keyence.com.mx/dwn/measure_skill1_kmx.pdf

[13] KEYENCE, http://www.keyence.com.mx/dwn/measure_optical_labo1_kmx.pdf

[14] Guillermo De Anda Rodriguez, monitoreo de la condicion de una herramienta de corte mediante sensores de fibra optica. Diciembre 2006.

[15] K. Jemielniak and O. Otman. *Catastrophic Tool Failure Detection Based on Acoustic Emission Signal Analysis*. Annals of CIRP. Vol. 47/1, pp.31-34. 1998.

[16] W. Meyer, U. Neumann and H. Hörl. *Acoustic Emission Measurement for Quality Control and Process Monitoring in Cutting Operations*. Report of the Technical University of Chemnitz. Faculty of Mechanical Engineering and Material Processing. Germany. 1996.

[17] N. Kasashima, K. Mori and N. Taniguchi. *On line Failure Detection in Face Milling Using Discrete Wavelet Transform*. Annals of the CIRP. Vol. 44, pp. 483-487. 1995.

[18] Takashi Matsumura, Takahiro Murayama, Eiji Usui. *Tool Wear Monitoring In Milling Process With Laser Scan Micrometer.* Tokyo Denki University. 2001.

[19] R. Portugal P. Desgaste Y Vida De Las Herramientas De Corte, Profesor De La Facultad De Ingeniería Industrial USMP.

[20] D. Barschdorff, L. Monostori, T. Kottenstede, G. Warnecke M. Müller. *Cutting Tool Monitoring In Turning Under Varying Cutting Conditons: An Artificial Neural Network Approach.* Proceedings of the Sixth International Conference on industrial and Engineering Applications of Artificial Intelligence and Expert Systems, pp. 353-359. Edinburgh. Scotland. 1993

[21] N. E. Mazini, J. M. Blanco, L. Iurman, D. Ziegler. Duración Del Filo En Plaquitas De Metal Duro Recubiertas. Universidad Nacional Del Sur, 2002.

[22] Tansel, I. N., Rodriguez, O., Trujillo, M., Paz, E., and Li, W. *Micro-end-milling – I. Wear and breakage*. Int. J. Mach. Tools Mf., 1998, 38(12), 1419–1436.

[23] Kegg, R. *Sensor history – machine tool applications table*. *In Proceedings of Workshop on Tool condition monitoring,* Paris, 1994, Vol. 3, p. 51, (CIRP).

[24] Dornfeld, D. A., Konig, W., and Kettler, G. *Present state of tool and process monitoring in cutting. In Proceedings of new developments in cutting*, VDI Berichte NR 988, Du¨sseldorf, pp. 363–376, 1993.

[25] A. Novak. “On-Line Prediction of the Tool Life”, Annals of the CIRP. Vol. 45, pp. 93-96. 1996.

[26] Kurada and C. Bradley. *A review of machine vision sensors for tool condition monitoring, Computers and Industry.* Vol. 34 Nº 1, pp. 55-72. 1997.

[27] Iván Domínguez L., Jorge A. Huerta R., Ricardo I. Montes R., Juan de D. Ortiz A., Jesús Pichardo C., Adrián L. García G. Miguel Aguilar C., David Jaramillo V., Mediciones De Cambio De Intensidad En Luz Láser Esparcida, Aplicada Al Monitoreo De Desgaste, Simposio de Metrología 25 al 27 de Octubre de 2006.

[28] J. Jurkovic, M. Korosec, J. Kopac, *New approach in tool wear measuring technique using CCD vision system*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 25 January 2005.

[29] J. U. JEON and S. W. KIM, *Optical Flank Wear Monitoring Of Cutting Tools By Image Processing*, Department of Production Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, June 8,1988.

[30] M T Mathew, P Srinivasa Pai, L A Rocha, *An effective sensor for tool wear monitoring in face milling: Acoustic emission*, *Sadhana* Vol. 33, Part 3, June 2008, pp. 227–233.

[31] E. Dimla and Snr. Dimla. *Sensor signals for tool-wear monitoring in metal cutting operations- a review of methods*. International Journal of Machine Tools & Manufacture. Vol. 40, pp. 1073-1098. 2000.

[32] A.K. Singh · S.S. Panda · S.K. Pal · D. Chakraborty, *Predicting drill wear using an artificial neural network*, Springer-Verlag London Limited 2005.

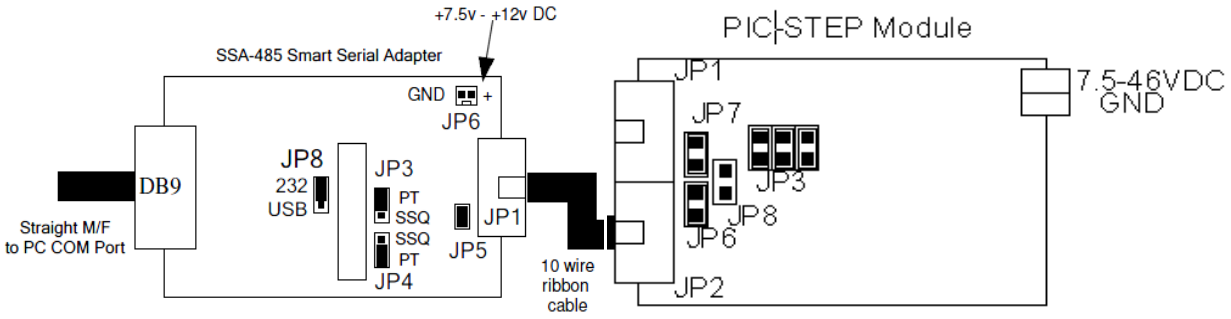
[33] j. Zhang, 2p.P.L.Regtien, *Illumination Methods For Optical Wear Detection,* Measurement Science Review, Volume 7, Section 3, No. 3, 2007.

[34] D.C. Oguamanam, H. Raafat and S. M. Taboun. *A machine vision system for wear monitoring and breakage detection of single-point cutting tools*. Computers in Industrial Engineering. Vol. 26 Nº 3, pp. 245-251. 1994.

[35] Louis d'Hainaut. Cálculo de incertidumbres en las mediciones, Editorial Trillas, México, pp. 28, 1978.

[36] http://www.jrkerr.com

ANEXOS
Diagrama de conexión eléctrico [36]



El conector lógico JP6 (adaptador SSA-485) solo se utiliza si la alimentación no se suministra a través de la red de comunicaciones por cable.

Definiciones de los conectores para el adaptador SSA-485.

RS232 Serial Connector **P1** (female DB9 connector)

Pin	*Definition*
2	RS232 Transmit Data Output
3	RS232 Receive Data Input
5	Ground
1,4, 6-9	Not Used

Network Connector **JP1** – 10 Pin Flat Ribbon IDC Socket

Pin	*Definition*
1	**SSA-485** XMT+
2	**SSA-485** XMT-
3	**SSA-485** RCV+
4	**SSA-485** RCV-
5	N.C.
6	GND
7	Logic Power (7.5 – 12vdc)
8	GND
9	Logic Power (7.5 – 12vdc)
10	GND

SSA-485 Jumpers

Pin	*Definition*
JP3, JP4	Selects operating mode. Jumper pins marked PT (Pass through) for operation as a simple converter (default). Jumper pins marked MB (Motion Basic) for optional stand-alone operation.
JP5	Logic power interconnection. Inserting JP5 connects logic power to the network connector JP1. Normally this jumper is installed.
JP8	Used to select RS232 or USB communications with the host computer. Jumper pins marked 232 (default) or USB for RS232 or USB operation. *Note:* This jumper is not present on Version 2 of the ***SSA-485*** board. Version 2 automatically selects between USB or RS232.

Definiciones de los conectores para la PIC-STEP.

Motor Connector P1 (DB15 female)

Pin	*Definition*
1	Phase A+
2	Phase B+
3	LED Drive 1 (connects to +5v through a 330 ohm resistor)
4	Limit switch 1 input (active HIGH)
5	Limit switch 2 input (active HIGH)
6	E-Stop input (active HIGH)
7	Thermistor input
8	+5v (output)
9	Phase A-
10	Phase B-
11	LED Drive 2 (connects to +5v through a 330 ohm resistor)
12	Limit Switch 1 return (GND)
13	Limit Switch 2 return (GND)
14	E-Stop return (GND)
15	Thermistor return (GND)

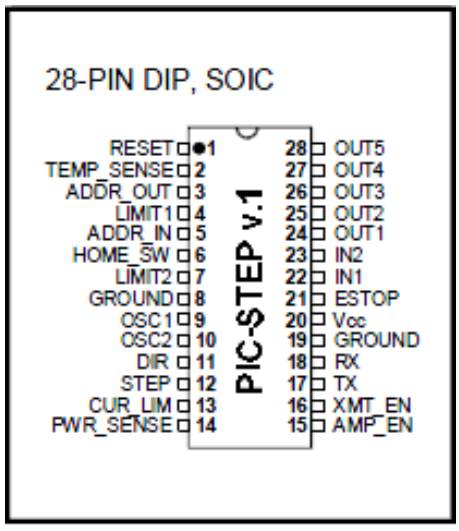
Network Connectors JP1, JP2 (10 pin shrouded header - 2 x 5, 0.100" spacing)

Pin	*Definition*
1	RCV+ (***Z232-485*** XMT+)
2	RCV- (***Z232-485*** XMT-)
3	XMT+ (***Z232-485*** RCV+)
4	XMT- (***Z232-485*** RCV-)
5	ADDR_IN on JP1, ADDR_OUT on JP2
6	GND
7	Logic power (7.5 - 12vdc)
8	GND
9	Logic power (7.5 - 12vdc)
10	GND

PIC-STEP Board Jumpers:

Jumper	*Description*
JP3	Connects ADDR_IN to GND. Insert jumper for the last module on the network (or if only 1 module is used)
JP3,JP4	Enables termination resistors on RX and TX. Insert these jumpers for the last module on the network (or if only 1 module is used).
JP6,JP7	Logic power interconnection. Inserting JP6 connects logic power to network connector JP2. Inserting JP7 connects logic power to JP1. These are used to control the distribution of logic power over the network cables. Normally both of these jumpers are installed.

Definiciones de los conectores del PIC.



Pin Number	*Description*
1	RESET input. Pull LOW to reset the chip
2	TEMP_SENS analog input (0 - 5v). This input can be tied to a thermistor bridge which lowers its voltage signal as the temperature rises.
3	ADDR_OUT output. This output is initialized to a HIGH state, and drops and stays LOW when a Set Address command is issued.
4	LIMIT1 input. This input is used as the forward limit switch input, and can be used for homing or as a general purpose input bit as well.
5	ADDR_IN input. Communications with the ***PIC-STEP*** will be disabled until this input goes LOW.
6	HOME_SW input. This input can be used for homing or as a general purpose input bit.
7	LIMIT2 input. This input is used as the reverse limit switch input, and can be used for homing or as a general purpose input bit as well.
8	Ground
9	OSC1 - This input accepts a 20 MHz clock input, or can be connected to one side of a 20 MHz crystal.
10	OSC2 - This pin can be connected to the other side of a 20 MHz crystal, and should be left unconnected if a TTL clock input is used.
11	DIR output. This signal is used by the stepper motor driver to set the direction of motion. DIR = LOW for forward motion, DIR = HIGH for reverse motion.
12	STEP output. This output is a rising pulse with a duration of 4.8 microseconds. It is used by the stepper motor driver to increment or decrement the position by one step.
13	CUR_LIM output. This is a 40 KHz *pulse width modulated* output (magnitude = 5v) which is used to set the current limit reference voltage for the stepper motor driver. This signal should be filtered with a resistor / capacitor filter and voltage divider to produce an analog voltage of the appropriate range for your stepper driver.
14	PWR_SENSE input. A LOW value on this pin will cause the AMP_EN output to be lowered, and any motion to be terminated. It should be HIGH for normal operation.
15	AMP_EN output. This output is set HIGH to enable the stepper motor driver and LOW to disable it.
16	XMT_EN output. This output is used to disable the output driver for an RS485 transceiver. It can be left unconnected for RS232 communications.
17	TX output. This output should be tied to the transmit input of an RS485 or RS232 transceiver chip.
18	RX input. This input should be tied to the receive output of an RS485 or RS232 transceiver chip.
19	Ground
20	Vcc - Tie to +5vdc.
21	ESTOP input. A HIGH input on this pin will terminate any motion.
22	IN1 input. General purpose input pin.
23	IN2 input. General purpose input pin.
24 - 28	OUT1 - OUT5 outputs. These general purpose outputs can be tied to control inputs of the stepper motor driver to set driver specific operating modes. Outputs 1-4 are initialized LOW, output 5 is initialized HIGH.

Artículo CERMA 2011

Technique to detect the wear of a cutting tool of 3 edges used in milling operations

Jaime de Jesús Reséndiz Pérez, Eduardo Castillo Castañeda
Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada-IPN Unidad Querétaro,
Cerro Blanco 141, Col. Colinas del Cimatario, Santiago de Querétaro, Querétaro, México
jresendizp0900@ipn.mx, ecast63@yahoo.com.mx

Abstract

In the process of machining the tool wear is a factor affecting the surface conditions of machined parts, thus it presents a technique to display the tool wear. The wear is estimated directly from a laser displacement sensor, using the triangulation principle. So, a laser serves as light-emitting element, a lens focuses the beam on the object, and this reflects the beam back through another lens which focuses on a CCD. In this way the sensor provides a measure of the distance between its extreme and the tool profile. Measurements were performed off-line with a precision below than 0.1 microns. Experimental results are shown for a vertical milling tool of 3 inserts and 2.54 cm of diameter.

1. Introduction

In recent years, sensor technology has evolved from being a simple diagnostic tool for machining to become an integral component in the machine tools. *In* the period 1950-1980, a wide range of sensors (thermocouples, accelerometers, strain gauges and acoustic emission sensors) were used to monitor certain parameters characteristic, especially the tool wear, cutting forces, vibration and tool breakage. In the early 90's, thanks to the advancement of signal processing techniques it developed new applications for analysis of the cutting tool. Currently, we are seeing a trend of integration of the sensors used in the development of systems for monitoring the cutting tool. The methods of tool wear that exist today can be classified into two distinct groups; the direct and indirect methods. Direct methods are based on optical technologies, while the indirect methods monitor tool conditions using associated parameters [1]. So during machining processes such as turning or milling, where material is removed, the wear of cutting tools significantly reduces the quality of the workpiece. Although current technology to estimate the wear of cutting tools, manufacturing is still mostly empirical methods used to evaluate the tool life, that is, the number of machining hours. When this empirical number expires, the tool must be removed, even though is still in good condition, so this method is suitable only when the tool is used exactly with the same cutting conditions during its entire life and the material of the workpiece is as homogeneous as to ensure a similar wear for a similar machining time. Only in very few occasions wear of the tool is verified by methods outside the human visual inspection to determine if it is still in good working condition. Therefore the best way to guarantee the quality of a final machining is making sure that the wear of the cutting tool is within a predefined range and if this is exceeded, the tool must be

immediately replaced with a new one. Figure 1 shows the geometry of the cutting tool for vertical milling operations analyzed in this study.

Figure 1 Geometry of the cutting tool

The most common method is monitoring the motor current that drives the main spindle. So when an edge of the cutting tool is worn, the next edge must remove the excess material, then the cutting force increases, causing an increase in the spindle motor current. When the current exceeds a preset value, the machining process must be stopped by sending a signal to the operator to verify or to replace the tool. This method is mostly used to detect broken tools, because in this case the current variation is very evident. An example of this technique can be appreciated in Figure 2.

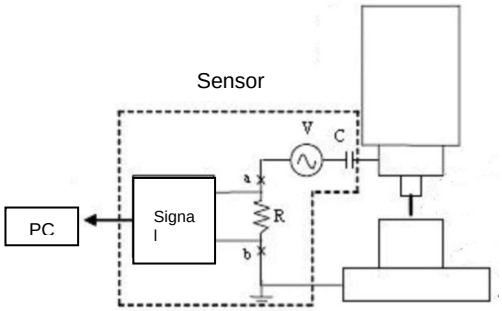


Figure 2 Diagram of the method of monitoring the motor current

A second method, used successfully in the industrial field is the acoustic emission monitoring of the cutting process [2, 3]. It is a similar strategy to the previous method, when the signal reaches a preset limit, the cutting process is interrupted. The work done at the Technical University of Warsaw, Poland [2] presented a technique for detecting tool wear using statistical analysis of acoustic emission. In Technical University of Chemnitz, Germany, the method of acoustic emission analysis has also been used to estimate the quality of the machined surface during a turning process [3], at the Mechanical Engineering Laboratory in Tsukuba, Japan, developed an application of wavelet transform for online prediction tool breakage during machining process [4], in this case, the monitored cutting force signal was taken (sensed) at the workbench. The work presented in [5], conducted by the University of Paderborn, Germany, presents a multisensor system based on neural networks, to monitor the correlation between variables in the process of evaluating the condition of the tool. The common strategy of all previous works has been the application of indirect methods to estimate the condition of the tool. These methods are usually based in monitoring physical signs, such as acoustic emission, cutting force and spindle power, to find its correlation with wear or tool breakage. Thus, in these cases, the main problem is finding a correlation function between signals and tool wear or breakage. The reliability of the correlation between indirect measures and the condition of the tool is a problem of difficult solution when are presented several cross-correlation signals that influence the condition of the tool. As a result, the work presented in [6] proposes a method of computer vision [7, 8] and monitoring the cutting forces to estimate the tool wear. Based in experimental analysis, a curve of edge wear is estimated to determine a prediction of tool life.

2. Sensor description

There are probably more options for measuring the displacement than any other measurable variable, creating a variety of sensors and other technologies applied to solving the problem of displacement, being laser sensor one of them. The measurement ranges of these sensors are very wide, from a few microns, until very high range (200m). Displacement sensors are used to measure different distance ranges.

2.1. Operation

The sensor determines the position of an object by reflected light. Therefore a laser transmitter projects a beam of light and its reception is focused through a lens in a light-sensitive device (receiver). As shown in Figure 3.

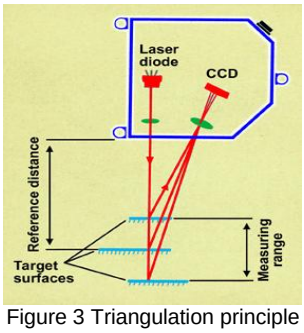


Figure 3 Triangulation principle

In this case the receiver element is a CCD (charge coupled device), which is an integrated circuit that contains a number of linked or coupled capacitors. Under the control of an internal circuit, each capacitor can transfer its electric charge to one or more of the capacitors that are at its side in the circuit, which is basically a chip that converts light signals into electrical signals (charge). The charge is read and converted in counts per second. In this way has the position of the reflected light on the CCD moves as changing the position of the object. The amount of displacement of the object is measured by detecting this change; this magnitude is amplified and processed by the electronics of the detector interface unit.

2.2. Measuring principle

The laser beam is focused onto the face of the tool that will be in contact with the piece and reflect an image (point) to the CCD through the optical system. As shown in Figure 4. Therefore the position of the image on the CCD varies as the tool wears.

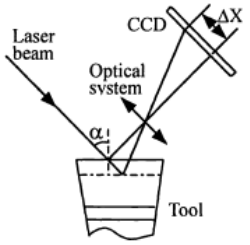


Figure 4 Measuring principle

2.3. Characteristics of the sensor

It is a sensor Keyence LK-G10 model, it works on the principle of triangulation, and it has a CCD receiver, is powered by 24v DC and 300mA, the sensor offers a sampling rate up to 50 KHz, and it can provide a repeatability of 0.01 microns.

The sensor can detect the object's surface and adjust the laser intensity to optimal point. Also the sensor monitors the laser emission time at high-speed, its power and the gain of the CCD, which is achieved with a wide adjustment range of intensity of light received. In addition you can make accurate measurements despite drastic changes in the condition of the surface of the piece to be measured. Also has a linearized CCD, which reduces errors at the edges of the pixels to achieve high accuracy, which is two times higher than conventional models.

Finally has a driver, which lets you connect up to two measuring heads, and incorporates, statistical functions, digital and analog outputs for each channel and RS-232 and USB communications, to cover a wide range of measurement requirements.

3. Experimental arrangement

The experimental arrangement for this work consists of a laser displacement sensor mark KEYENCE model LK-G10, whose reference distance is 10mm and has a measuring range of + - 1mm, is powered by 24V DC and current of 300mA, also was used with a stepper motor controlled interpass of 1.8 degrees by a picstep which allows half steps, so that the engine performed interpass of 0.9 degrees, thus achieving 400 points for each complete rotation of the cutting tool. The sensor is mounted on an aluminum base and was located in front of the tool while it is rotated, as shown in Figure 5, a sufficient distance to enter the range of the sensor after each full rotation; the sensor was raised 1mm to continue the scan tool to complete the area of the inserts. So, the sensor provides a distance *Rho* and circular motion provides an angle *theta*, now we can get a graph in polar coordinates, and finally when we have all the data from scanning the cutting tool, we can realize a transformation of polar coordinates to Cartesian coordinates and obtain the 3D point cloud.

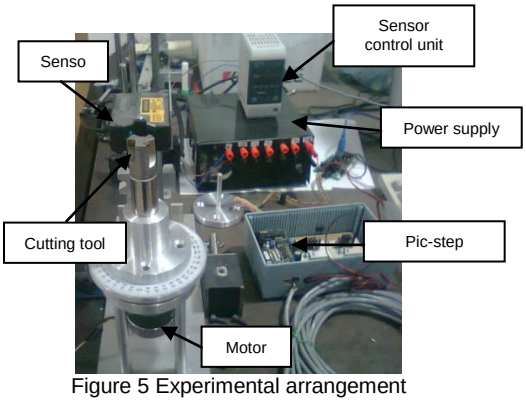


Figure 5 Experimental arrangement

4. Results

Figure 6 shows the polar graph obtained by Matlab analysis of the data generated by the sensor, it shows only the tip of the inserts, which are in perfect condition.

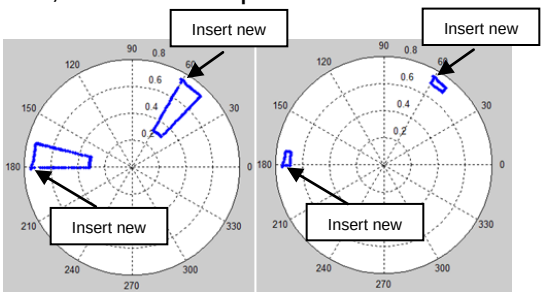


Figure 6 Polar graph obtained with inserts in perfect conditions.

Figure 7 shows the polar graph obtained by Matlab analysis of the data generated by the sensor, it shows only the tip of the inserts, where one of which is worn.

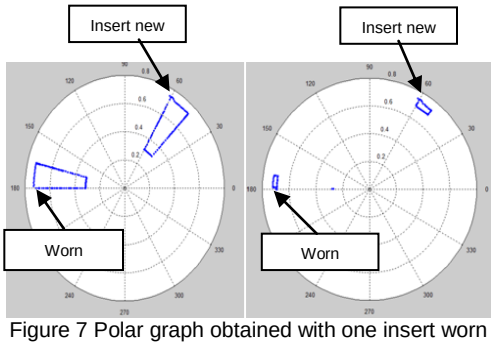


Figure 7 Polar graph obtained with one insert worn

And finally with the data obtained from the analysis of the cutting tool we can obtain a 3D point cloud, this is achieved by performing a conversion from polar coordinates to Cartesian coordinates, Figure 8 shows the cloud of points when the two inserts used in this study are in good condition.

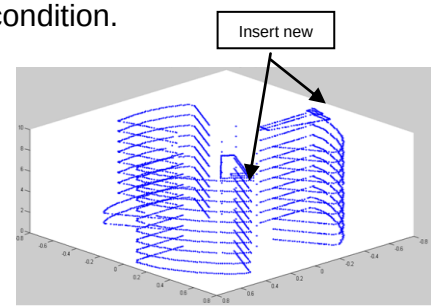


Figure 8 point cloud in 3D with inserts in perfect conditions

In addition, these data also can obtain an isometric profile with the help of Geomagic, as shown in Figure 9. In the first figure on the left side we can see the tool with new inserts, while the right side shows the tool with one of the inserts worn.

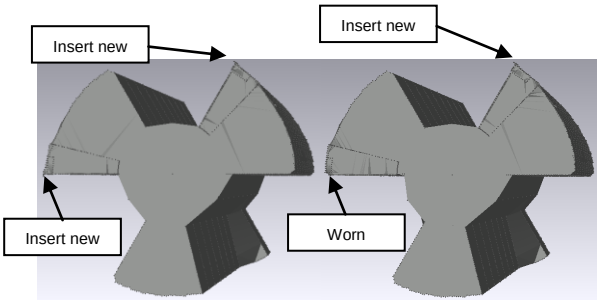


Figure 9 Isometric profile obtained with Geomagic

5. Conclusion and future works

The method developed in this project has the ability to reconstruct the profile of the tool after a single round of the tool. This technique can also be used to solve problems on-line detection of faults as automatic detection of flaws in metal plates.

6. Acknowledgements

Authors express their gratitude to CONACYT, for providing support to develop this project.

7. References

[1] E. Castillo-Castañeda. "On line wear detection of milling tools using a Displacement Fiber Optic Sensor". Journal of Applied Research and Technology. Vol. 1 Nº 2. July 2003.

[2] K. Jemielniak and O. Otman. "Catastrophic Tool Failure Detection Based on Acoustic Emission Signal Analysis". Annals of CIRP. Vol. 47/1, pp. 31-34. 1998.

[3] W. Meyer, U. Neumann and H. Hörl. "Acoustic Emission Measurement for Quality Control and Process Monitoring in Cutting Operations". Report of the Technical University of Chemnitz. Faculty of Mechanical Engineering and Material Processing. Germany. 1996.

[4] N. Kasashima, K. Mori and N. Taniguchi. "On line Failure Detection in Face Milling Using Discrete Wavelet Transform". Annals of the CIRP. Vol. 44, pp. 483-487. 1995.

[5] D. Barschdorff, L. Monostori, T. Kottenstede, G. Warnecke and M. Müller. "Cutting Tool Monitoring in Turning under Varying Cutting Conditions: An Artificial Neural Network Approach". Proceedings of the Sixth International Conference on Industrial and Engineering Applications of Artificial Intelligence and Expert Systems, pp. 353-359. Edinburgh. Scotland. 1993.

[6] A. Novak. "On-Line Prediction of the Tool Life", Annals of the CIRP. Vol. 45, pp. 93-96. 1996.

[7] Kurada and C. Bradley. "A review of machine vision sensors for tool condition monitoring", Computers and Industry. Vol. 34 Nº 1, pp. 55-72. 1997.

[8] D.C. Oguamanam, H. Raafat and S. M. Taboun. "A machine vision system for wear monitoring and breakage detection of single-point cutting tools". Computers in Industrial Engineering. Vol. 26 Nº 3, pp. 245-251. 1994.

[9] E. Dimla and Snr. Dimla. "Sensor signals for tool-wear monitoring in metal cutting operations- a review of methods". International Journal of Machine Tools & Manufacture". Vol. 40, pp. 1073-1098. 2000.

[10] O. Ryabov, K. Mori, N. Kasashima, K. Uehara, "An In-process Direct Monitoring Method for Milling Tool Failures Using a Laser Sensor". CIRP Annals. Vol. 45 Nº 1. 1996.