

Proyecto de grado en modalidad de aplicación

Sistema de Control de calidad en fresado por escariador a partir de la visión artificial

Juan David Henao Tovar^{a,c}, Melissa Paredes Forero^{a,c}

Ing. Martha Ruth Manrique Torres, PhD^{b,c}, Ing. Ivan Fernando Mondragón Bernal, PhD^{b,c}

^aEstudiante de Ingeniería Industrial

^bProfesor, Director del Proyecto de Grado, Departamento de Ingeniería Industrial

^cPontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia

Resumen

El control de calidad es una de las áreas más importantes dentro de las empresas, ya que es por medio de este que se verifica que el cliente va a recibir un producto en excelentes condiciones. Teniendo en cuenta lo anterior, en el presente trabajo de grado se encontró la propuesta de un sistema de control de calidad manual, enfocado a industrias que hacen uso de centros de mecanizados para el proceso de acabado en metales. Para el desarrollo de este, se utilizó el procesamiento de imágenes para identificar la rugosidad y reducir productos no conformes en dichas industrias.

Este sistema de control de calidad utilizó el código realizado en el trabajo de grado llamado “Sistema de control de calidad por procesamiento de imágenes” realizado por los autores para medir la rugosidad superficial [1]. A partir de los datos recolectados, calibración y modificaciones necesarias se integró dicho código a la máquina EMCO MILL 450 para realizar el monitoreo del proceso.

Palabras clave: Procesamiento de imágenes, rugosidad aparente, centro de mecanizado, control de calidad.

1. Planteamiento y Justificación del problema

Actualmente, las industrias manufactureras del sector metalmecánico han desarrollado metodologías para reducir al máximo el desperdicio de materia prima. Dentro de las metodologías para este fin se encuentran seis sigmas y lean manufacturing. Seis sigma ha sido una filosofía en la que, por medio de metas a corto plazo, se logran objetivos a largo plazo enfocadas en diseñar e implementar procesos más robustos en cuanto a la variabilidad de los resultados reduciendo los productos no conformes[2]. Lean manufacturing, es definida como “un proceso continuo y sistemático de identificación y eliminación del desperdicio o excesos”[3].

Estas metodologías se realizan con el fin de minimizar costos de producción y brindar al cliente un producto de buena calidad. De esta forma, se asegura una mayor sostenibilidad y se crean vínculos con el cliente que permiten sostenerse en el mercado. Uno de los factores por los que se pierde o desperdicia materia prima son las piezas o productos no conformes, que generan pérdidas en material, tiempo, horas hombre y máquina, entre otros [1].

En los procesos de fabricación se utiliza el control de calidad para verificar las condiciones del producto y que este cumpla con las características especificadas. Dicho control se realiza de dos formas, la primera es tomar una muestra del lote a fabricar, al cual se le realiza una serie de mediciones para asegurar con cierto nivel de

confianza que el producto se encuentra dentro del rango de aceptación. Sin embargo, esto no elimina la incertidumbre de cuáles piezas no son conformes en el lote y puede generar inconvenientes con los clientes, poniendo en duda la confiabilidad de los productos. La segunda forma, es realizar una inspección en línea para así revisar todas las piezas y mitigar el error de hacer llegar producto no conforme al cliente. Sin embargo, esta inspección se realiza, generalmente, al final de la operación y las piezas que no cumplen con los estándares son desechadas después de su producción, perdiendo producto en forma de materia prima, tiempo, horas hombre y máquina.

Para reducir la pérdida de material se sugiere hacer un sistema de control de calidad en proceso a cada pieza en el momento de su fabricación. Esto permite, al igual que en la inspección en línea, eliminar el error por muestreo y manejar estadísticas de calidad para predecir posibles errores de producción a partir de tendencias.

Durante el control de calidad una de las características a tener en cuenta es la rugosidad superficial, ya que esta determina la fatiga prematura de las piezas, su durabilidad y el punto de desgaste del material. Esta característica debe cumplir con algunas normas como: ISO 4287, DIN 4762 y la calidad de rugosidad según la hoja de especificación del producto. La rugosidad superficial de la pieza depende de diferentes factores evidenciados en el diagrama de espina de pescado que se muestra en la figura 1, los cuales se clasifican en cuatro ramas: parámetros de mecanizado –los cuales se refieren a la profundidad de corte, al refrigerante, velocidad de avance y a la velocidad de corte–, propiedades de herramientas de corte –lo componen el material de la herramienta, forma y ángulos de corte de la herramienta–, propiedades de la pieza –características del material como la dureza y el largo de la pieza– y fenómenos de corte –donde se presentan vibraciones y formaciones de viruta–. Los parámetros de corte están definidos en la literatura en forma de rangos para condiciones de mecanizado ideales, temperatura, esfuerzos, entre otros; los cuales no se pueden reproducir de la misma manera y son complementados con la experiencia del operario [4].

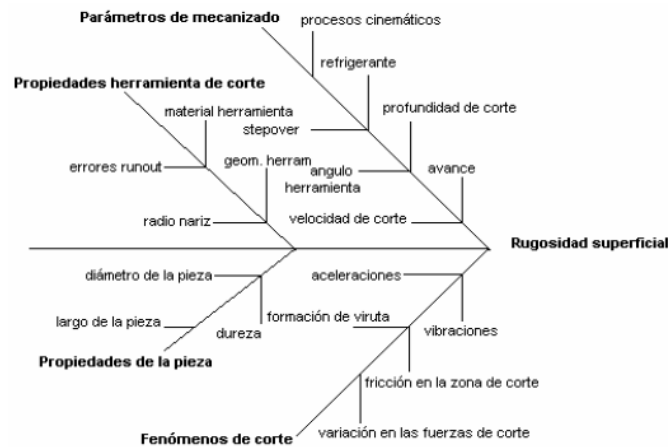


Figura 1. Diagrama con factores que afectan la rugosidad superficial [4]

Para asignar la variable o característica de rugosidad superficial requerida por un producto, o para procesos de acabado en los que es importante asegurar un valor de rugosidad, con el fin de evitar fracturas y lograr un alto índice de durabilidad, para esto, en los mecanizados se utilizan refrigerantes –derivados de los hidrocarburos– sobre la pieza para reducir la temperatura y evitar deformación del material. Dichos refrigerantes, además de ser costosos, son contaminantes y no biodegradables [5]. El mecanizado en seco es una alternativa para reducir el uso de refrigerantes. Sin embargo, este tipo de mecanizado vuelve más crítica la selección de parámetros de corte y el control del mecanizado [1], ya que al no tener control de la temperatura los valores de parámetros ideales de corte tienden a aumentar el tiempo de mecanizado y dificultando obtener la rugosidad superficial del material.

Teniendo en cuenta lo anterior, es importante resaltar que realizar un control de calidad después de mecanizar la pieza evita que el cliente reciba un producto con errores de fabricación. Sin embargo, los costos que dicha

pieza no conforme genera, los absorbe netamente la empresa. A diferencia de la inspección en línea, este trabajo de grado sugiere realizar el control de calidad mientras se está realizando la transformación del material, de tal forma que pueda corregir posibles errores durante el proceso y evitar que el producto sea desechado [1].

2. Antecedentes

Previamente a este trabajo de grado, se ha explorado el comportamiento del mecanizado en seco teniendo en cuenta variables como: el tipo de escariador, el tipo de material y los parámetros de corte. Uno de los estudios realizados fue un trabajo de grado llevado a cabo en la Universidad Javeriana para mecanizar acero SAE 8620 en seco, en este se identificaron los valores ideales de corte, los cuales se observan en la tabla 1, y se concluyó que la variable que más afectaba en el proceso de mecanizado es la velocidad de avance [6]. En este estudio también se determinó que el escariador ideal para esta operación, en términos de eficiencia en el mecanizado y vida útil, es el HSS Co TiN –escariador de alta velocidad de acero rápido al cobalto con recubrimiento de nitruro de titanio– comparados con el HSS, HSS Co y HSS TiN. Esto se realizó para identificar un recubrimiento ideal para trabajo en seco, ya que los recubrimientos en las herramientas permiten disminuir la temperatura permitiendo eliminar el refrigerante, obtener mayor resistencia al desgaste y aumentar la vida útil de la herramienta.

Tabla 1. Parámetros ideales de corte para acero SAE 8620[6]

Velocidad de Avance	264,8 mm/min
Velocidad de Corte	63,99 m/min
Velocidad de giro del Husillo	2037 RPM

Sin embargo, los datos en este estudio se obtuvieron a partir de la medición de la rugosidad una vez terminada la pieza, lo cual, a pesar de encontrar unos parámetros ideales de corte, no permite hacer un seguimiento al desarrollo de la producción para realizar predicciones o identificar un desgaste de la herramienta pieza por pieza, ya que el costo de dicho control sería muy elevado. Otro problema encontrado fueron piezas que, al no tener ningún tipo de refrigerante y en condiciones críticas, sufrieron deformación plástica haciendo de la pieza mecanizada inservible y en algunos casos deformación por fusión. Esto no fue posible identificarlo durante el proceso hasta que terminó el mecanizado, lo cual en un proceso de producción es una demora en la línea e implica costos para la empresa [6].

Para solucionar dichos inconvenientes, en el trabajo de grado de ingeniería electrónica realizado por los autores se desarrolló un código de procesamiento de imágenes para identificar la rugosidad de un material. Esto se realizó con una cámara de alta velocidad, con la que fue posible determinar la topografía de la pieza y se pudo identificar el parámetro de rugosidad en una sección mecanizada [1]. A partir de esta característica es posible identificar la velocidad de avance por medio de modelos matemáticos.

Actualmente, existen varios modelos matemáticos utilizados para relacionar la rugosidad superficial con la velocidad de avance y algunos de los factores que intervienen en el mecanizado como el diámetro de la herramienta y velocidad de husillo. Los pioneros en esta investigación fueron Boothroyd y Knight en 1989 [7], quienes dividieron la rugosidad en dos: una ocasionada por la velocidad de avance y la geometría de la herramienta y otra que ocurre por irregularidades en el proceso de corte como vibraciones, viruta, temperatura y demás [7]. A partir de este resultado se desarrolló otro modelo –Pamies [7]– el cual, al igual que Boothroyd, clasificó la rugosidad en dos: los factores directos del proceso y los indirectos. En los factores directos se encuentran los que afectan la máquina, la pieza y la sujeción de la pieza a la máquina, y los factores indirectos son los que afectan a la herramienta y las condiciones de corte [7].

En el año 2015 se realizó un nuevo modelo para predecir la rugosidad a partir del diámetro de la herramienta, la velocidad de avance por corte fz y el ángulo de incidencia de la herramienta sobre la cara de contacto [8]. En la figura 2 se observan los resultados de una prueba realizada en el 2015, en la que se hizo la comparación entre la medida del rugosímetro y la rugosidad calculada por el método Pames, Boothroyd y Manrique a partir de

los parámetros de corte. En este se observa que la ecuación Manrique posee un menor error que el método Paimes y Boothroyd con respecto al valor real de un mecanizado demarcado con la línea azul.

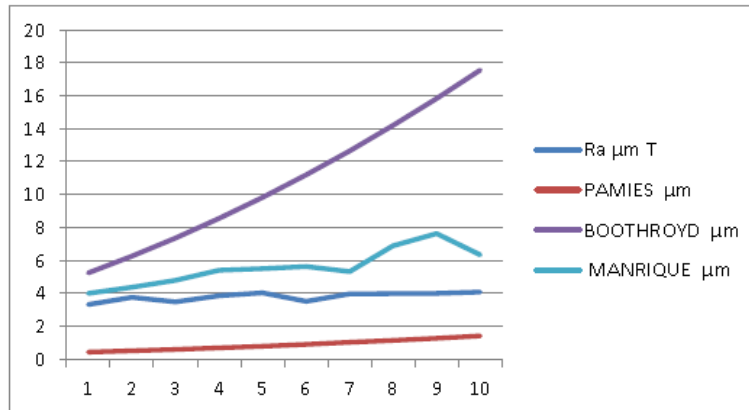


Figura 2. Comparación de métodos de predicción de rugosidad, en el eje horizontal se observa un corte realizado a partir de unos parámetros de corte específicos y en el eje vertical la rugosidad superficial en μm [8]

A partir de este estudio, se concluyó que por medio del método Manrique es posible identificar la velocidad de avance asumiendo los otros parámetros de corte constantes [8].

En la industria, el procesamiento de imágenes para el control de calidad se usa como técnica para verificar todos los productos que están saliendo de una línea de producción, esto permite reducir, o en algunos casos eliminar, el transporte del material a un proceso de control de calidad aparte de la línea de producción, esto conlleva a un alza de productividad y se reducen las operaciones que no agregan valor al producto[9]. Algunas empresas que han optado por utilizar una verificación mediante la visión artificial son: la empresa JIVA en 1991 propuso un proceso de lectura automático de datos del documento nacional de identidad e IMAQ a partir de la intensidad de la luz posee una aplicación para leer displays LCDs[10]. Adicionalmente, esta tecnología tiene aplicaciones innumerables, hay presencia en sectores industriales como: textil, confecciones textiles, siderurgia, agrícola y cuero [11].

Cabe resaltar que se deben tener en cuenta problemas encontrados en la captura de imágenes, como la iluminación, la cámara a utilizar, la velocidad de adquisición y los efectos que pueden surgir en la captura. Dentro de los más críticos se encuentran: imágenes borrosas por la velocidad de mecanizado, utilizar refrigerantes que impiden una visión clara de la superficie mecanizada y la acumulación de la viruta removida [8]. Es importante resaltar, que dicho proyecto no se ha implementado en la industria de ninguna manera, este es el primer acercamiento a dicha solución.

3. Objetivos

Diseñar y evaluar un sistema de control de calidad durante el mecanizado en la máquina EMCO MILL 450, haciendo uso del procesamiento de imágenes del trabajo de grado “Sistema de control de calidad por procesamiento de imágenes”.

1. Diseñar e integrar el sistema de procesamiento de imágenes a la máquina EMCO MILL 450 e incluir una interfaz de usuario.
2. Seleccionar las operaciones en las que es válido el sistema para una correcta visualización del área mecanizada durante la toma de datos para el control de calidad.
3. Seleccionar la herramienta apropiada para la ejecución de las operaciones válidas en el proceso de acabado que no interfiera con el sistema de adquisición del control de calidad.
4. Determinar un rango de parámetros de corte para el correcto funcionamiento del sistema mediante pruebas de corte.
5. Diseñar e implementar un protocolo de pruebas con el cual se pueda determinar la confiabilidad del sistema.
6. Realizar la evaluación de la viabilidad del sistema y analizar los resultados obtenidos.

4. Metodología

4.1. Diseñar e integrar el sistema de procesamiento de imágenes a la máquina EMCO MILL 450 e incluir una interfaz de usuario.

Para integrar el procesamiento de imágenes con la máquina EMCO MILL 450, fue necesario recopilar los códigos realizados en el Trabajo de Grado “Sistema de control de calidad por procesamiento de imágenes” [1] en este trabajo se manejaron dos códigos por aparte, uno para la captura y adquisición de las imágenes y el otro para realizar el procesamiento de imágenes y determinar el valor de rugosidad. Para este trabajo de grado se realizó la unión de dichos códigos, con el fin de conocer exactamente el valor de rugosidad en el momento en que se adquirió la imagen y para poder realizar cambios en el mecanizado con cortos tiempos de respuesta a un defecto de calidad.

Para integrar el sistema de visión artificial a la máquina, se diseñó y se fabricó un soporte, el cual permite un anclaje de la cámara al centro de mecanizado, Este soporte debe mantener una ubicación de la cámara congruente o sincronizada con los movimientos de la herramienta y que en una posición en donde no se vea afectada por las vibraciones del mecanizado, evitando ruido en la imagen capturada. Para esto, se realizó dicho soporte a partir de una sección de ángulo en aluminio en donde se realizaron agujeros para asegurar la cámara con tornillos, y una ranura la cual permite el anclaje con la máquina. En la Figura 1, se muestra la pieza generada utilizando la herramienta SolidWorks (a) y el montaje realizado en máquina incluyendo las condiciones ambientales como el ajuste de la iluminación (b). Los planos de la pieza se pueden visualizar en el anexo A.

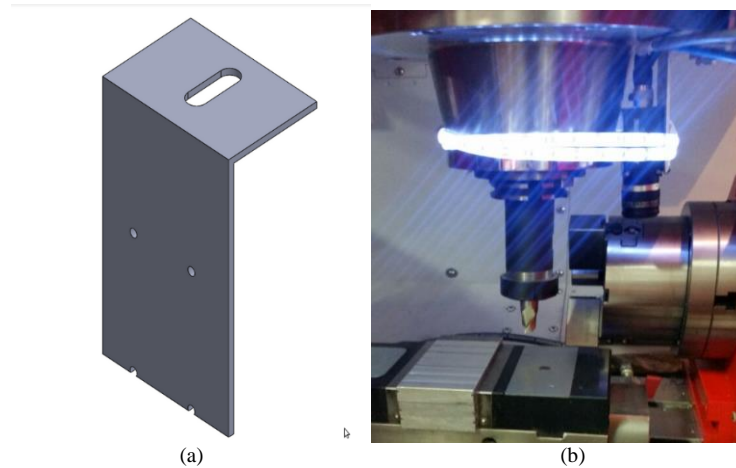


Figura 3 Montaje de Sistema de Captura

En el desarrollo del trabajo de grado se utilizó un computador alterno para el control de calidad, en este se creó un código que integra la captura de imágenes con la cámara GeniCam HM640 y el procesamiento de las mismas. Esto con objetivo de identificar la rugosidad del material y la acción que se debe tomar, en términos de la variación de la velocidad de avance, para obtener una rugosidad objetivo. Adicionalmente, el código cuenta con una interfaz visual que le permite al operario un monitoreo continuo de los valores de rugosidad obtenidos. Para el diseño de la interfaz fue necesario identificar las posibles necesidades del operario durante el monitoreo. En la Figura 4 se observa la interfaz en bruto, en donde se encuentra la información que el operario debería conocer para realizar un monitoreo adecuado.

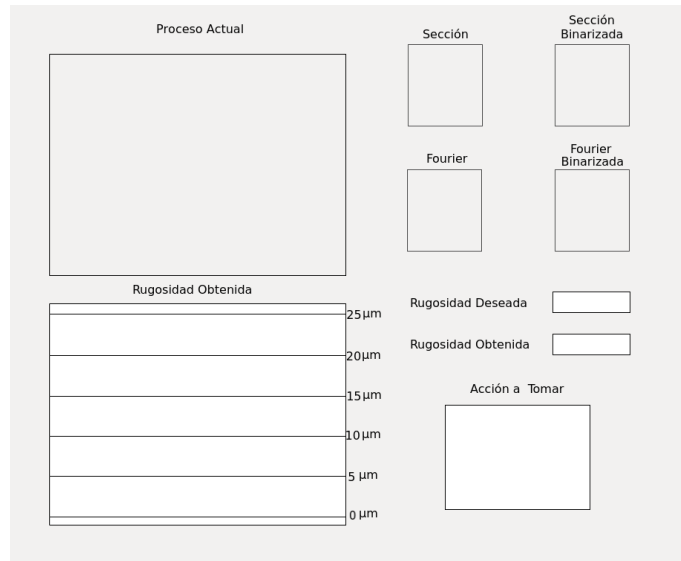


Figura 4 Interfaz gráfica en blanco

Para una mayor claridad del funcionamiento de la interfaz y de la necesidad de su contenido, en la Tabla 1 se realiza una explicación de la funcionalidad de cada uno de sus componentes al igual que un ejemplo en donde se puede identificar cuando se realiza una lectura correcta o errónea. Finalmente, en la Figura 5 se presenta una imagen de como se ve la interfaz de usuario ya puesta en funcionamiento, en donde ya se pueden observar los diferentes parámetros explicados anteriormente.

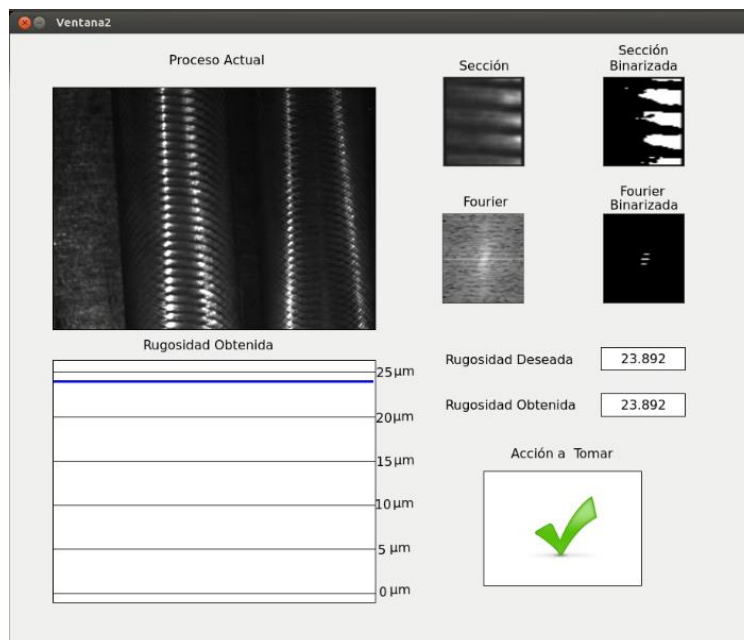
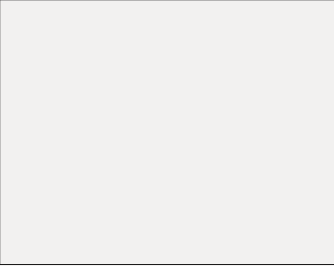
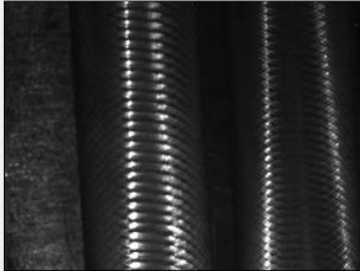


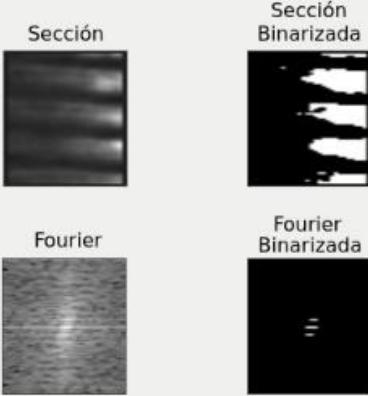
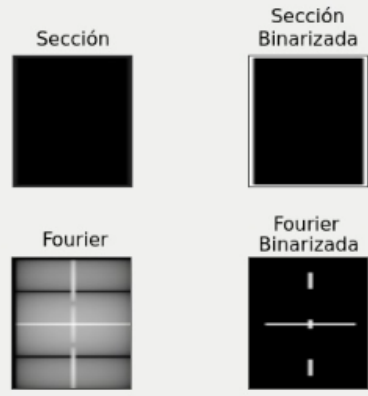
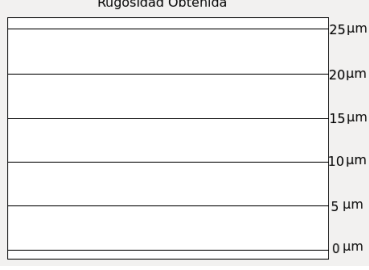
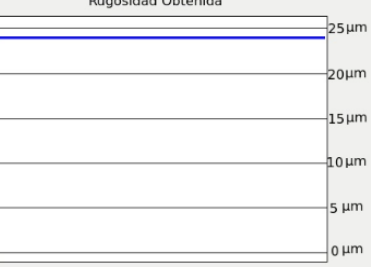
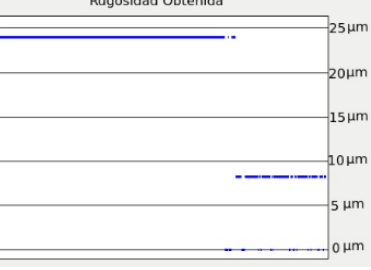





Figura 5 Interfaz de usuario en funcionamiento

Tabla 2 Partes de interfaz gráfica

Componente	Funcionalidad	Lectura correcta	Lectura Errónea
<p data-bbox="338 337 443 354">Proceso Actual</p> 	<p data-bbox="604 354 1083 472">Este componente permite al usuario visualizar el panorama completo que captura la cámara e identificar si la cámara se encuentra correctamente ubicada.</p> <p data-bbox="604 508 1083 594">En el caso de lectura errónea, se puede identificar que la cámara no se encuentra visualizando la pieza mecanizada.</p>	<p data-bbox="1249 337 1354 354">Proceso Actual</p> 	<p data-bbox="1652 337 1757 354">Proceso Actual</p> 
	<p data-bbox="604 652 1083 889">Este componente presenta los recuadros del procesamiento de imágenes, en donde se recorta la imagen, se binariza, se aplica Fourier y por último se vuelve binarizar. Estos además de ser los pasos del procesamiento permite identificar el recorte ampliado y si el sistema es capaz de identificar las líneas de mecanizado.</p> <p data-bbox="604 925 1083 1133">Cuando el procesamiento de imágenes realiza una correcta lectura de imágenes, la imagen binarizada de Fourier muestra 3 pequeñas líneas centrales, cuya separación indica la rugosidad, en caso de tener líneas verticales o muy extensas es una señal de que el sistema no es capaz de procesar dicha imagen.</p>		

	<p>Este componente presenta una gráfica de los resultados obtenidos, desde el inicio del programa permite visualizar cambios abruptos durante el mecanizado.</p>		
<p>Rugosidad Deseada <input type="text"/></p> <p>Rugosidad Obtenida <input type="text"/></p>	<p>Se presentan los datos de rugosidad, tanto el deseado (es definido por el usuario, dependiendo del acabado deseado) y la obtenida (es el resultado después de realizar el procesamiento de imágenes previamente descrito). Un valor 0 implica que el sistema no identificó una rugosidad.</p>	<p>Rugosidad Deseada <input type="text" value="23.892"/></p> <p>Rugosidad Obtenida <input type="text" value="23.892"/></p>	<p>Rugosidad Deseada <input type="text" value="23.892"/></p> <p>Rugosidad Obtenida <input type="text" value="0"/></p>
<p>Acción a Tomar</p> 	<p>Este componente presenta una ayuda visual de la acción que el operario debería hacer, se presentan cuatro casos de acción a tomar:</p> <p>Ok: La rugosidad deseada es igual a la obtenida por ende no se debería realizar ninguna acción.</p> <p>Error: Indica que el sistema de procesamiento de imágenes no fue capaz de identificar el patrón.</p> <p>Subir/bajar: El operario debería subir/bajar el valor de la velocidad de avance para corregir la diferencia de rugosidad.</p>	<p>Acción a Tomar</p> 	<p>Acción a Tomar</p> 

4.2. *Seleccionar las operaciones en las que es válido el sistema para una correcta visualización del área mecanizada durante la toma de datos para el control de calidad.*

En el mecanizado de desprendimiento de material, más específicamente en las operaciones de fresado, se pueden clasificar en dos grupos principales, el fresado frontal y el periférico, la diferencia entre las dos radica en la perpendicularidad del eje de la herramienta con respecto a la superficie del material mecanizado. En el caso del mecanizado frontal el eje se encuentra perpendicular al material; por el contrario, el mecanizado periférico posee el eje paralelo al material. [12]

Esta diferencia afecta de forma crítica el patrón de mecanizado ya que, debido a la posición del eje, el fresado frontal es el único capaz de general el patrón circular sobre el material. Por esta razón, no se tendrán en cuenta para este análisis las operaciones de fresados periféricos. Para una mejor visualización de la perpendicularidad de la herramienta en estas operaciones, en la Figura 6 se observan las diferentes operaciones del fresado y sus ramificaciones. En esta imagen se observan las diferentes operaciones del fresado frontal que se van a analizar, estas son el fresado convencional, parcial, terminal, de perfil, de cavidad y de contorno superficial. Para el análisis se realiza una tabla en donde se pueda ver una descripción de la operación y las razones por las cuales se puede usar o no el sistema de control de calidad con esta operación, este análisis se puede observar en la Tabla 3.

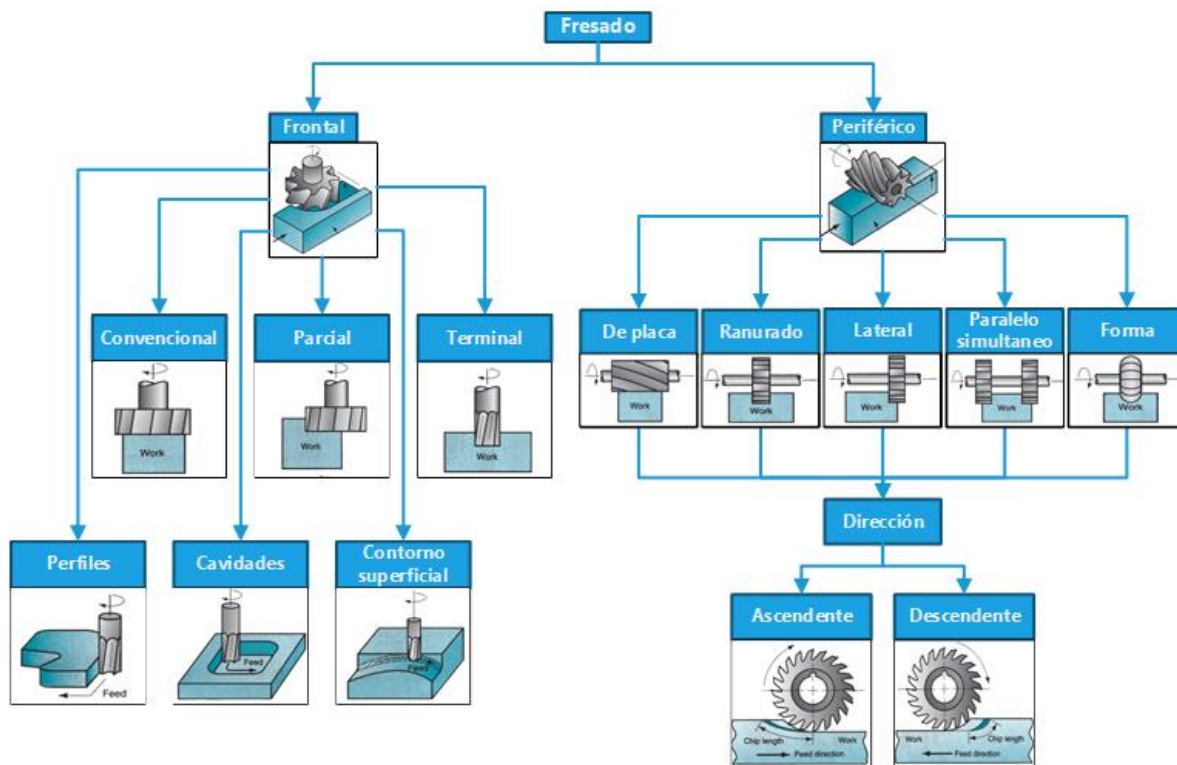


Figura 6 Operaciones de fresado Fuente: Diagrama realizado por el autor, imágenes tomadas de [12]

Tabla 3 Descripción y validez de operaciones de fresado [12]

Operación	Descripción	Validez de Operación con Sistema
<p>Convencional</p> 	<p>Fresado en el cual la herramienta posee un mayor diámetro que el material, cubriendo la totalidad del material a mecanizar.</p>	<p>Esta operación es válida mientras el total o al menos un tercio de la herramienta se encuentre sobre el material, esa sección de la herramienta debe cubrir toda la zona central.</p>
<p>Parcial</p> 	<p>Fresado en el cual un extremo de la herramienta se encuentra fuera del material mientras que el resto de la herramienta mecaniza el material.</p>	<p>Esta operación es válida mientras toda la zona central se encuentre enfrentado al material, de lo contrario no es posible identificar el patrón.</p>
<p>Terminal</p> 	<p>Fresado en el cual la herramienta posee un menor diámetro que el material, produciendo canales y ranuras.</p>	<p>Esta operación es válida siempre y cuando se manejen profundidades pequeñas, es decir que, con el sistema de iluminación instalado, se aseguren los luxes necesarios sobre la superficie sin generar iluminación excesiva sobre la superficie no mecanizada. Otro aspecto a tener en cuenta en este tipo de operación es cuando se generan ranuras de forma ya que se debe verificar que la cámara pueda visualizar la superficie sin generar sombras de los bordes del material.</p>
<p>Perfiles</p> 	<p>Fresado en el cual se realiza el desbaste con el perfil de la herramienta.</p>	<p>Esta operación no es válida en el sistema debido a que no genera una marca de manera frontal y no se produce un patrón circular enfrentado a la cámara.</p>
<p>Cavidades</p> 	<p>Consiste en un fresado similar al terminal para realizar cavidades y de menor profundidad.</p>	<p>Al igual que la operación de fresado terminal, la operación de cavidades es válida mientras se cumplan con las condiciones de iluminación.</p>
<p>Contorno superficial</p> 	<p>Este mecanizado utiliza una herramienta con punto de bola para generar superficies en 3d</p>	<p>Esta operación no es válida para el sistema debido que al utilizar una herramienta con punto de bola no se genera una superficie plana con patrón circular, esto debido a que el objetivo de este tipo de fresado es mecanizar superficies orgánicas con curvas.</p>

A partir de este análisis se puede concluir que las operaciones en las cuales es válido el sistema de control de calidad desarrollado por los autores son el fresado convencional, parcial, terminal y de cavidades. Sin embargo, se debe tener en cuenta que se deben asegurar las condiciones de mecanizado como la iluminación, la distancia de la cámara a la superficie de mecanizado, y se debe asegurar que solo se realicen mecanizados de derecha a izquierda y en línea recta, esto último debido a que la cámara se encuentra situada a la derecha del husillo, lo que permite visualizar la sección mecanizada en un menor tiempo debido a la cercanía.

4.3. Seleccionar la herramienta apropiada para la ejecución de las operaciones válidas en el proceso de acabado que no interfiera con el sistema de adquisición del control de calidad.

Teniendo en cuenta que la máquina a utilizar es el centro de mecanizado EMCO MILL 450, ubicado en el Centro Tecnológico de Automatización Industrial (CTAI) de la Pontificia Universidad Javeriana, Se identificará la herramienta apropiada para realizar un mecanizado en conjunto con el procesamiento de imágenes y que se pueda acoplar al equipo y a las operaciones identificadas anteriormente, para esto es necesario partir de características que debe tener la herramienta de corte, tales como, altamente resistente al desgaste, conservación del filo a altas temperaturas, buenas propiedades de tenacidad, reducción del coeficiente de fricción [6]. Así mismo, es importante identificar y delimitar las características que debe tener la herramienta de corte para que se pueda acoplar de forma correcta al sistema como, por ejemplo, el material que las compone, el número de cortes que poseen, la forma de trabajo, sujeción de la máquina, su geometría, entre otras. Para esto es necesario analizar las características de la herramienta de forma independiente y su funcionalidad.

En las operaciones de fresado se utilizan dos tipos de herramientas, las fresas de plaquitas intercambiables o de cuerpo entero. Las cuales se diferencian en su funcionalidad ya que las fresas enterizas poseen un menor salto al momento de producir el corte [13], mientras que las fresas de plaquitas son utilizadas para el desbaste y con diámetros grandes (mayores a 12 mm). Este trabajo de grado está enfocado en las operaciones de acabado, por lo que el uso de la fresa de cuerpo entero produce una mayor seguridad de su acabado. [13]



Figura 7 Fresa de plaquitas (a) y de cuerpo entero (b) [13]

Para identificar la herramienta ideal para el sistema de control de calidad, se tuvieron en cuenta cinco factores, estos son el número de dientes, el ángulo de inclinación de la hélice, el perfil de hélice, material y diámetro de la herramienta.

4.3.1. Número de dientes

El número de dientes en una herramienta representa el número de cortes que se realizarán por giro, esto implica que, a menor número de dientes, se tendrá una mayor separación entre las marcas, lo que cambia el patrón obtenido en el mecanizado y su rugosidad, en este caso, al no tener una resolución microscópica, es necesario que las marcas obtenidas por el paso de la herramienta sean visibles y distinguibles por la cámara, este valor está relacionado con la resolución de la cámara la cual es de 600×480 píxeles y su sección recortada es de 70×30 píxeles, en esta área debe verse con claridad más de dos marcas diferenciadas para poder realizar el procesamiento por lo que en este caso se debe utilizar un número de dientes reducido (2 cortes).

4.3.2. Ángulo de inclinación de la hélice

El ángulo de hélice es una característica que afecta las fuerzas de corte que se producen al mecanizar, esto posee un alto impacto en la rugosidad del material. Al aumentar el ángulo de hélice, la fuerza de corte es menor, por lo que se obtiene una menor rugosidad superficial [14]. Esta característica no afecta el patrón obtenido en el mecanizado, sin embargo, al afectar la rugosidad se debe utilizar el ángulo de incidencia de la herramienta con el cuál se realizó la calibración del programa, la cual posee un ángulo de incidencia de 45° como se observa en la figura 8 (b).

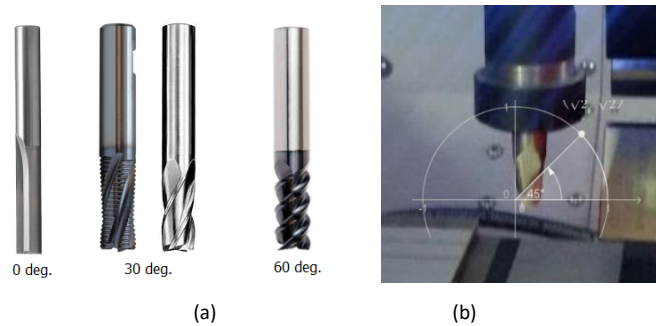


Figura 8 Ángulo de inclinación de hélice de herramienta [15]

4.3.3. Perfil de Hélice

El perfil de la hélice permite facilitar el corte durante el mecanizado, en escariadores de cuerpo entero se encuentran tres tipos de perfil; el recto, utilizado principalmente para operaciones de acabado; el plano, utilizado para semi-desbastes; y el redondo, el cual es utilizado para desbastes [16], estos tres perfiles se pueden distinguir gráficamente por las perforaciones en el borde de la hélice como se muestra en la Figura 9 Debido a que el sistema de control de calidad se utiliza en operaciones de poca penetración y se desea una operación de acabado, se debe seleccionar una herramienta de perfil plano.

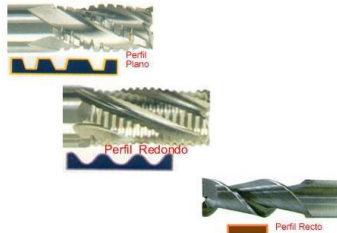


Figura 9 Perfil de hélice [16]

4.3.4. Material

En el mercado se encuentran una gran variedad de materiales para las herramientas, entre estos se encuentran: acero al carbono (empleadas en trabajos con madera y resinas), de acero rápido conocidas como herramientas de HSS (para trabajar metales), de cerámicos sin recubrimiento (para metales duros y fundiciones de hierro) y de cerámico con recubrimiento (en materiales duros, especiales para máquinas de alta velocidad)[8]. Debido a las condiciones del mecanizado, la herramienta a utilizar debe ser de acero rápido, sin embargo, debido a las velocidades de avance que se manejan, es necesario utilizar una herramienta con recubrimiento de cobalto para evitar vibraciones que afecten el patrón del mecanizado.

4.3.5. Diámetro de la herramienta

El diámetro de la herramienta a utilizar, debe ser seleccionado a partir de las capacidades del sistema de captura de imágenes, este posee una visión reducida de 30 pixeles de ancho. Por esta razón, la sección central debe poder visualizarse claramente dentro de la ventana de la imagen evitando que se vean los extremos del mecanizado y sin exceder en el ancho de la ventana.

Teniendo en cuenta los parámetros delimitados anteriormente, la herramienta a utilizar debe mantener las siguientes características:

- Tipo de Herramienta: escariador de cuerpo entero
- Número de dientes: 2
- Ángulo de hélice: 45°
- Perfil de hélice: Recto
- Material: HSS Co
- Diámetro: 16 mm

4.4. Diseñar e implementar un protocolo de pruebas con el cual se pueda determinar la confiabilidad del sistema.

Para realizar las pruebas del sistema fue necesario asegurar que el experimento se esté replicando en cada una de las pruebas, para ello se identificaron las variables que afectaban el sistema de visión y mantener un protocolo para realizar la prueba de tal forma que solo se realice la modificación de una única variable.

Para las variables que afectan el sistema, tanto mecánicas como de entorno, se definió un estándar para la prueba, esto permite identificar las variaciones que se van a realizar. A continuación, se muestran las variables tenidas en cuenta durante el diseño del protocolo de prueba y el estándar a manejar durante la prueba.

Variable	Estándar para Prueba
Iluminación	A partir de las especificaciones del código utilizado para la captura de imágenes se definió un estándar de 83 lux debajo de la herramienta.
Distancia de trabajo	La distancia de trabajo desde el sensor de la cámara hasta la pieza a visualizar debe mantenerse constante a 153 mm esto debido a que al acercarse o alejarse la cámara se modifica el espacio visualizado entre líneas, por lo que no es posible identificar la distancia real entre las líneas.
Foco de cámara	El foco de la cámara debe mantener una buena visualización de la pieza en la distancia de trabajo estándar, a pesar de no tener un valor cuantitativo para definir el enfoque de la cámara, este se puede realizar manualmente. Para evitar posibles interferencias sobre este factor en las pruebas, se realizó una marca que indicó en dónde debe ubicarse para manejar la misma medición en todas las observaciones. El lente a utilizar fue Kowa LM3NCM el cual posee un lente focal de 3.5mm y rango focal de 0,1 m - ∞.
Velocidad de Avance	La velocidad de avance es un factor que afecta directamente la rugosidad del material, por esta razón se realizó una variación en 5 diferentes velocidades de avance (4, 6, 8, 10 y 12 m/min)
Velocidad de Husillo	Dentro de las delimitaciones del programa se definió una velocidad de husillo constante de 2000 RPM, sin embargo, se realizará una prueba con las velocidades adyacentes para determinar si es válido el sistema con otros parámetros de corte.
Perpendicularidad	Se debe asegurar que la pieza en bruto permanezca de forma perpendicular a la herramienta para asegurar que se mantenga la misma profundidad de corte. Para esto se realiza un planeado de la pieza en bruto corrigiendo posibles errores de nivel en el montaje de la pieza.
Herramienta de fresado	El tipo de herramienta utilizado, a pesar de mantener el mismo patrón de corte, afecta el corte realizado y por ende la profundidad del patrón, valor que no podemos distinguir debido a la posición y resolución de la cámara. Por esta razón, la herramienta debe permanecer constante durante las pruebas realizadas.

Durante la realización del trabajo de grado hubo un cambio de herramienta debido a una fractura de la herramienta inicial (HSS Co), al tener material previamente mecanizado por dicha herramienta, se realizaron pruebas al patrón realizado por la herramienta HSS Co. Una vez concluidas esas pruebas se realizaron pruebas para identificar las posibles variaciones que se puedan generar con la nueva herramienta HSS y de esta forma concluir con las pruebas.

La prueba consistió en el mecanizado de una línea horizontal de derecha a izquierda. Con el programa en ejecución se realizó el recorrido de la cámara sobre toda la superficie mecanizada, este internamente guardaba los valores de rugosidad obtenidos en un archivo "datos.txt" los cuales fueron analizados posteriormente para identificar los errores encontrados durante el mecanizado y determinar la confiabilidad del sistema. Se realizaron 3 series de pruebas; la primera consistió en una línea mecanizada utilizando una única velocidad de avance, la cual fue replicada para las cinco velocidades de avance delimitadas; la segunda consistió en realizar cambio de velocidad durante el mecanizado, acción que debería realizar el operario al identificar un error en el mecanizado; Por último, se modificó la velocidad e husillo para identificar un rango de parámetros de corte válidos para el sistema.

Una vez realizado el protocolo de pruebas se procede a realizar las pruebas con las especificaciones dadas, para esto se utilizó una placa de aluminio de $14\text{ cm} \times 6\text{ cm} \times 1.5\text{ cm}$ en donde se realizaron todas las líneas de mecanizado de las diferentes series como se muestra en la Figura 10.

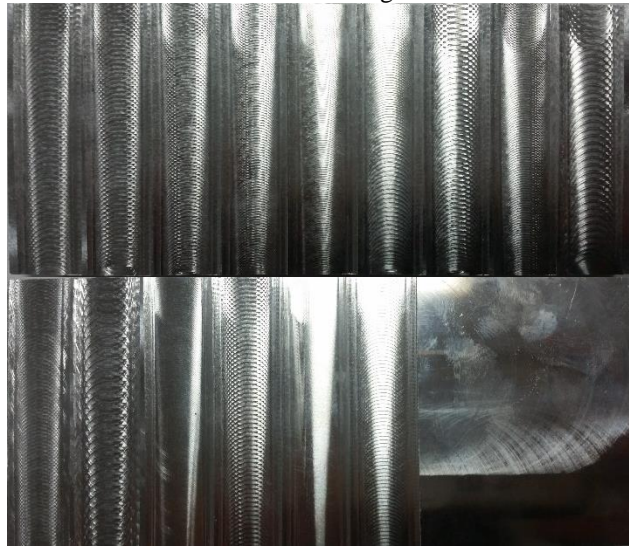


Figura 10 Mecnizados de prueba

Una vez el mecanizado y las pruebas del software estuvieron completas, los resultados se deben comparar con las medidas realizadas por un rugosímetro, para estas medidas se tomaron cinco muestras en diferentes partes de la pieza y se determinó una velocidad promedio para la comparación.

4.5. Determinar un rango de parámetros de corte para el correcto funcionamiento del sistema mediante pruebas de corte.

Para determinar los parámetros ideales de corte se tuvieron en cuenta las pruebas realizadas, en la primera y tercera serie, esto implica visualizar las variaciones en los resultados para las velocidades de avance y husillo. A partir de la comparación de estos resultados y la rugosidad medida por rugosímetro se determinó un rango de parámetros de corte entre los que se encuentran: Velocidad de avance, velocidad de husillo, número de dientes de la herramienta y diámetro de la herramienta. Este análisis se encuentra en el apartado de resultados.

4.6. Realizar la evaluación de la viabilidad del sistema y analizar los resultados obtenidos.

Para realizar la evaluación de la viabilidad del sistema se hizo un análisis de los datos recopilados en la serie de pruebas número 1, con el fin de determinar en qué porcentaje el sistema se comporta de forma correcta, para esto, se tomó una muestra de 600 datos proporcionados como respuesta del mecanizado y se analizaron los datos con el fin de determinar el nivel de porcentaje con el cual se puede asegurar que el sistema funciona correctamente. Cabe resaltar, que dicho análisis se hizo discriminando el valor de velocidad avance y el tipo de herramienta a utilizar (HSS CO o HSS), debido a que el comportamiento del mecanizado es diferente y es necesario discriminarlo de esa forma. Este análisis, los resultados y los impactos pertinentes se encuentran en el apartado de resultados.

5. Componente de Diseño en ingeniería.

Este capítulo responde al objetivo específico de la creación del diseño en ingeniería el cual es obligatorio para todos los proyectos de grado.

5.1. Declaración de Diseño: El diseño propuesto en este trabajo de grado es la integración del centro de mecanizado EMCO MILL 450 junto con el procesamiento de imágenes. Este último diseñado en el trabajo de

grado “Sistema de control de calidad por procesamiento de imágenes” desarrollado por Melissa Paredes Forero y Juan David Henao Tovar, para obtener un sistema de control de calidad en proceso. Este código permite reconocer la rugosidad de un material; sin embargo, se adaptó para identificar la rugosidad mientras se está mecanizando una pieza de tal forma que el operario pueda realizar una intervención al momento de generarse el error, para esto se deben mantener constantes parámetros como la iluminación, el espacio, el cableado y distancia a la pieza que es posible obtener, debido a la configuración del equipo y del sistema de visión – configuración cámara en mano-. Este código también se adaptó para informar al usuario si, debido a la rugosidad de la pieza, se debe aumentar o disminuir la velocidad de avance por medio de una señal visual, además de visualizar el proceso actual. La finalidad de este sistema de control de calidad es facilitar la corrección manual de errores que son evidenciados durante el proceso.

5.2. Proceso de diseño

Para desarrollar la componente de diseño se siguieron los siguientes pasos:

- 1) Se definió el problema a solucionar en el trabajo de grado, esto se realizó a partir del objetivo general.
- 2) Una vez definido el objetivo se definen los criterios y las restricciones que aplican dentro del trabajo de grado.
- 3) A partir de estos parámetros de diseño, se identificaron las posibles soluciones, entre estos se hallaron las posibles formas de realizar la interfaz de usuario, para este caso se tuvieron en cuenta 3 posibles librerías. Qt, GTK y Open CV.
- 4) Una vez identificadas las posibles librerías utilizadas para generar una interfaz se realizó una tabla comparativa y se revisó la viabilidad de la herramienta en cuestión de facilidad de uso de la librería, y compatibilidad de la misma con los códigos de captura y procesamiento. El resultado de esta comparación se muestra a continuación.

Librería	Facilidad de Uso	Compatibilidad
Qt	Facilidad de información: Alta Modo de uso: a partir de interfaz	La librería no es compatible con el código de captura de la cámara
GTK	Facilidad de información: Media Modo de uso: A partir de comandos de texto	Esta librería posee compatibilidad con la librería de la cámara; sin embargo, no se conoce la versión de la librería utilizada.
Open CV	Facilidad de información: Alta Facilidad de uso: A partir de comandos de texto	Esta librería posee compatibilidad con la librería de la cámara y la misma versión es utilizada en ambos códigos.

- 5) A partir de esta tabla comparativa se seleccionó la librería open CV para realizar dicho procesamiento.
- 6) Una vez elegida la librería se especifican las condiciones de dicha librería, para este caso se utilizará la librería open CV versión 2.4.1

5.3. Requerimientos de desempeño: Las características del diseño propuesto se enlistan a continuación.

- El ajuste de la iluminación se realizó de manera externa para una correcta adquisición de la imagen.
- La ubicación de la cámara debe permitir realizar un fácil mantenimiento y operación del centro de mecanizado y del sistema de visión.
- El sistema de captura de imágenes se ajusta a las operaciones y herramientas seleccionadas para su correcto funcionamiento.
- El sistema de captura no debe interferir con las posiciones en el cambio de herramienta.
- La interfaz que muestra la rugosidad de la pieza y la indicación para el cambio de velocidad de avance es intuitivo para el operario.

5.4. Pruebas de rendimiento: Las pruebas del sistema se realizaron en 3 series, la primera consistió en una línea mecanizada utilizando una única velocidad de avance, la cual fue replicada para las cinco velocidades de avance

delimitadas; la segunda consistió en realizar cambio de velocidad durante el mecanizado, acción que debería realizar el operario al identificar un error en el mecanizado; Por último, se modificó la velocidad e husillo para identificar un rango de parámetros de corte válidos para el sistema.

5.5. *Restricciones*: El diseño propuesto debe limitarse a ciertas restricciones, entre estas se encuentran:

- El uso del sistema de control de calidad solo aplica para mecanizado en seco, esto debido a que el uso de refrigerantes y lubricantes interfiere en la captura de imagen y puede dañar la cámara si no se cuenta con una protección especial.
- El procesamiento de imágenes solo se realizó en metales, esto con el objetivo de limitar el rango de materiales a trabajar y los rangos de parámetros de mecanizado.
- No se tuvieron en cuenta herramientas distintas al escariador, para la selección de la herramienta se utilizará la gama estándar de este tipo de herramienta.
- El sistema solo se aplicó para procesos de acabado, profundidades máximas de 3 mm, velocidad de giro alta y velocidad de avance mínima.

5.6. *Cumplimiento del estándar*: Las normas y estándares que rigieron este trabajo de grado fueron:

- ISO 4287: Norma que hace referencia a la terminología de la rugosidad superficial. Se encuentra dividida en dos partes, la primera se refiere a la superficie y sus parámetros, y la segunda a la medición de estos [17]. En este trabajo de grado se manejó la terminología adecuada según la norma para referirse a la rugosidad superficial y sus notaciones.
- ISO 11562: Esta describe las características de los filtros de corrección de fase en la medición de la rugosidad [17]. Esta norma no aplica en la medición de la rugosidad por visión utilizada ya que no se realizó ningún muestreo, sin embargo, en la medida de la rugosidad por rugosímetro se realiza el muestreo de puntos en donde se realiza el filtro para suavizar los valores obtenidos, esta configuración de calibración se puede observar en el menú del rugosímetro en donde se evidencia la aplicación del filtro gaussiano que es el exigido por la norma. A continuación, se presenta una imagen del equipo donde se puede apreciar la verificación del filtro y las componentes que indica el estándar.



Figura 11 Configuración rugosímetro Mitutoyo

- ISO 468: Esta norma describe los parámetros, los valores y las reglas generales en la especificación de la rugosidad superficial [17]. En este trabajo de grado, se dio cumplimiento a la norma ISO 468, debido a que por definición de norma se debe conocer como rugosidad superficial el término Ra y así se trabajó a lo largo de este trabajo de grado, así mismo, se manejó un nivel máximo de rugosidad aparente de 40 μm , la cual no excede el rango definido por la norma para rugosidad superficial ($0,08 \mu\text{m} < \text{Ra} < 400 \mu\text{m}$). Además, se tuvo en cuenta el no incluir datos en donde se encuentren ralladuras en el acabado, debido a que por norma la rugosidad superficial no admite defectos superficiales.
- ISO/IEC 10641: La norma indica el modo en que se debe probar un programa de procesamiento de imágenes y su documentación [17]. Se da cumplimiento a la norma ISO/IEC 10641, debido a que se

adecuó un espacio propicio para realizar las pruebas del software, a nivel de iluminación y distorsión. Así mismo, a nivel de documentación se cumplió, debido a que por cada prueba realizada con el software se generó un archivo .txt con los datos resultantes del software, asegurando tomar todos los datos posibles y se manejó evidencia en video de las pruebas realizadas para el cumplimiento de la norma.

6. Resultados

6.1. Resultados obtenidos a partir de las pruebas realizadas

Serie 1: Estas pruebas se realizaron a partir de un mecanizado lineal bajo una velocidad constante de husillo de 2000 RPM con dos herramientas distintas, la primera consiste en un escariador HSS Co de 15 mm de diámetro, a partir de esta herramienta se realizó el procesamiento de imágenes, por lo que es la referencia para identificar si el programa funciona correctamente. La segunda herramienta es un escariador HSS de 15 mm de diámetro.

En la Figura 12 se observan los resultados obtenidos con el programa durante el mecanizado con la herramienta HSS Co la cual posee un recubrimiento de cobalto. Dentro de esta se muestra cada una de las imágenes u observaciones realizadas con el sistema de captura. Como podemos observar, en la gráfica se observa una gran confiabilidad del proceso, lo que implica que el programa se encuentra funcionando correctamente.

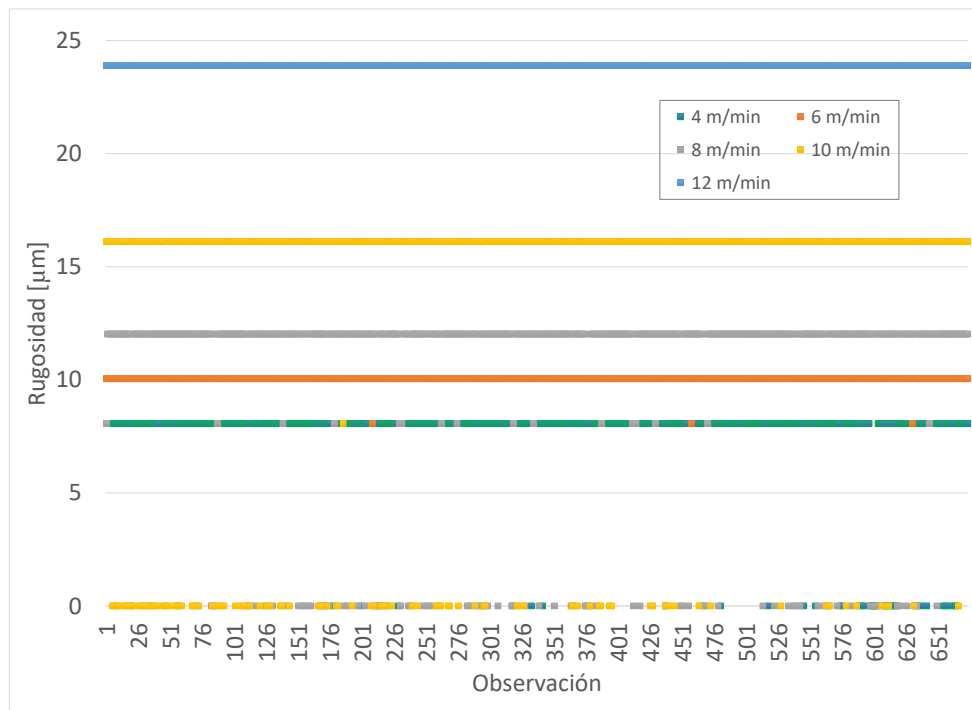


Figura 12 Resultados del programa con herramienta HSS Co

Debido al cambio de herramienta fue necesario comparar los datos obtenidos con la nueva herramienta, y si se genera algún cambio con respecto a la anterior, por esta razón se realizó un mecanizado bajo los mismos parámetros de mecanizado con un cambio de herramienta eliminando el recubrimiento de cobalto. Estos resultados se pueden observar en la Figura 13, en donde se evidencia que a pesar de haber cambio de herramienta el patrón obtenido posee las mismas características geométricas y una gran estabilidad de los resultados. Esta estabilidad se puede observar en la Figura 14 en donde se evidencia el porcentaje de error a las diferentes velocidades utilizando ambas herramientas.

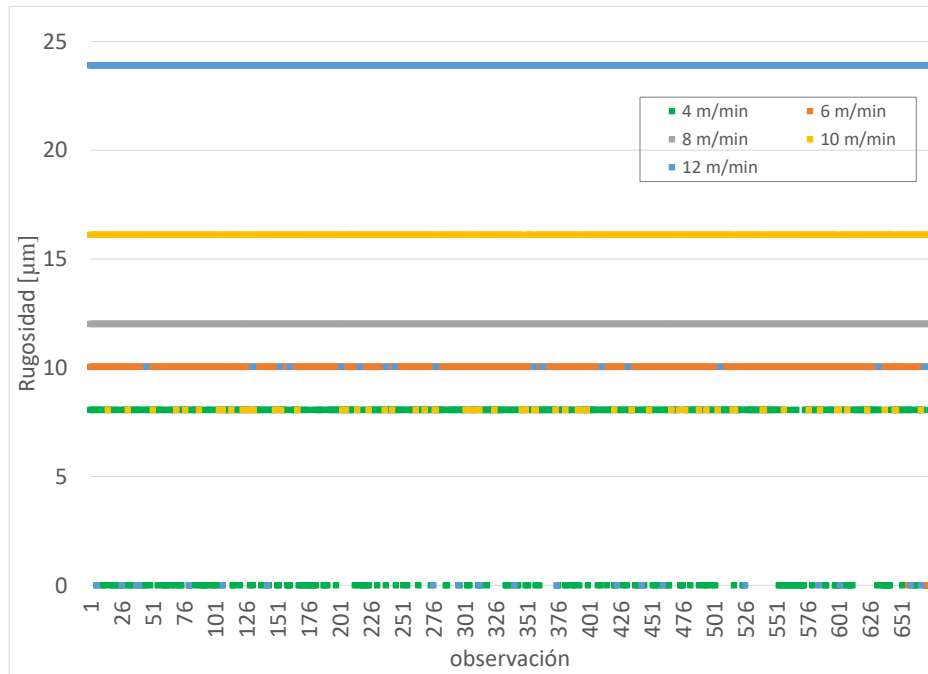


Figura 13 Resultados del programa con herramienta HSS

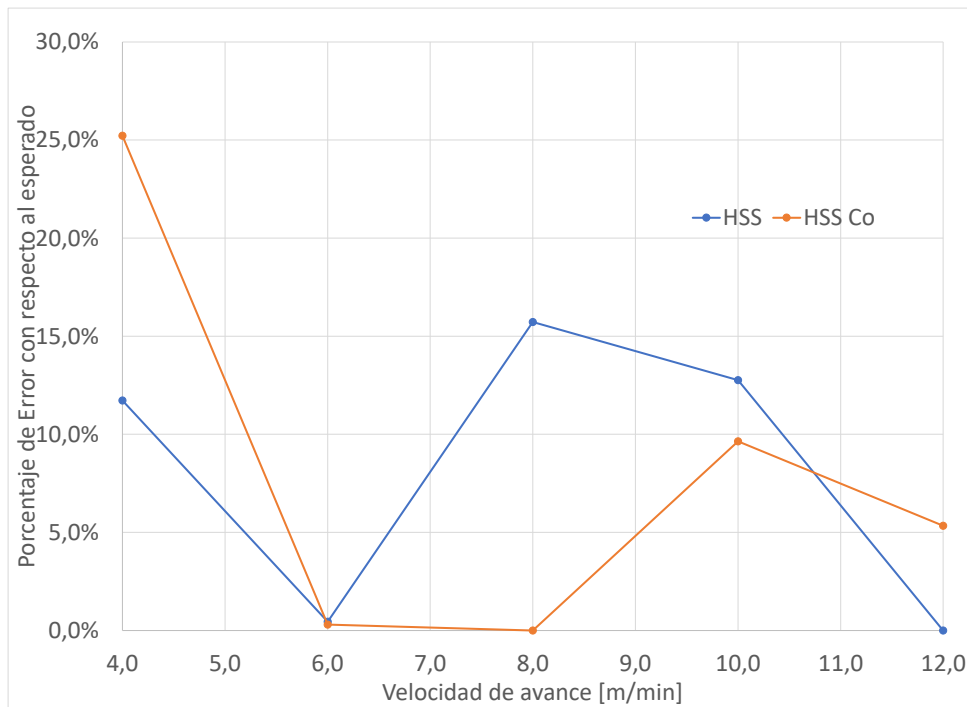


Figura 14 Estabilidad de los resultados a partir del valor esperado.

Aparentemente los resultados se muestran estables; sin embargo, se deben comparar estos resultados con el valor de la medida por rugosímetro de la rugosidad generada en ambos casos, Por esta razón se realizaron cinco medidas en diferentes partes de la pieza y se comparó el promedio de las series de datos medidas por el rugosímetro y las tomadas por el programa de control de calidad por visión. En la Figura 15 Comparación de la rugosidad para HSS y HSS Co se observan los resultados de la comparación de estas series, lo que evidencia

que el cambio de herramienta, a pesar de mantener las mismas características geométricas, posee un cambio en la profundidad de las marcas haciendo que se traslade la curva de rugosidad hacia arriba.

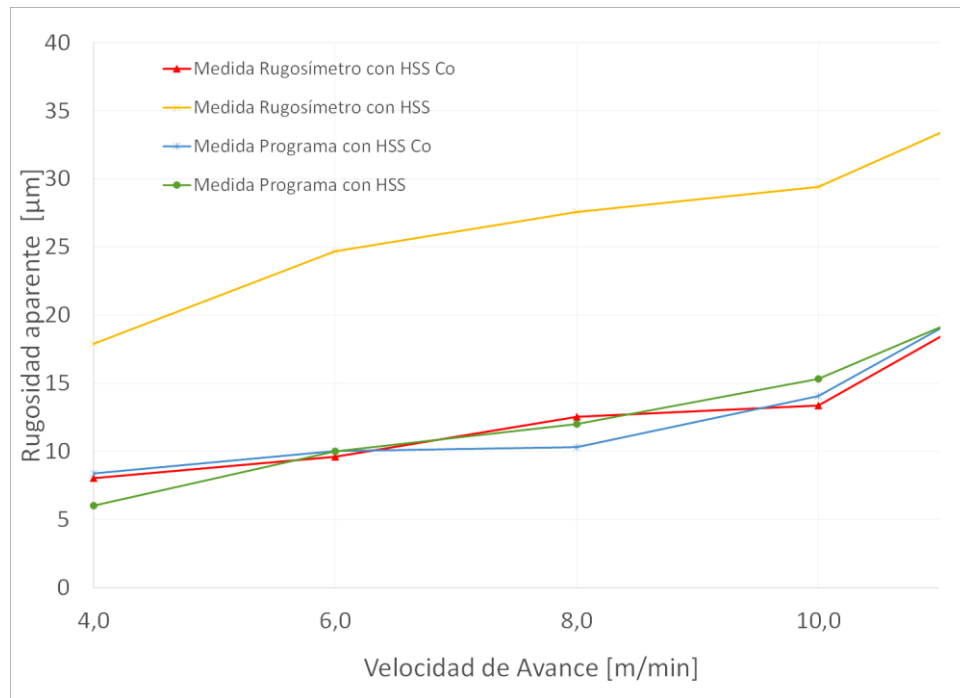


Figura 15 Comparación de la rugosidad para HSS y HSS Co

El traslado de la gráfica implica que a menos que se mantengan las condiciones de mecanizado no es posible identificar la rugosidad del material mecanizado. Por esta razón para este trabajo de grado solo se tendrán en cuenta los resultados obtenidos bajo ciertas especificaciones de tipo de herramienta, iluminación, y rangos de velocidades.

6.1. Uso del control de calidad

Para concluir con las pruebas del sistema fue necesario simular una situación de corrección de velocidad de avance. El objetivo de este sistema de control de calidad es informar al operario si la velocidad de avance se encuentra en el valor adecuado para obtener una rugosidad específica. Sin embargo, se debe comprobar que el sistema pueda reaccionar bajo la modificación de la velocidad de avance durante el mecanizado y visualizar el comportamiento de este durante la transición. Para esto se realizaron dos pruebas cambiando la velocidad de avance, la primera prueba se inició con una velocidad de avance de 10 m/min cambiando a una velocidad de 6 m/min y la segunda inicia con 10 m/min para pasar a una velocidad de 12 m/min. En la Figura 16 se observa la transición entre una velocidad y la otra para la primera prueba y en la Figura 17 para la segunda. A partir de estas gráficas se puede identificar una buena transición que permite obtener conclusiones rápidamente sobre la rugosidad después del cambio de velocidad, lo cual es una ventaja durante su uso.

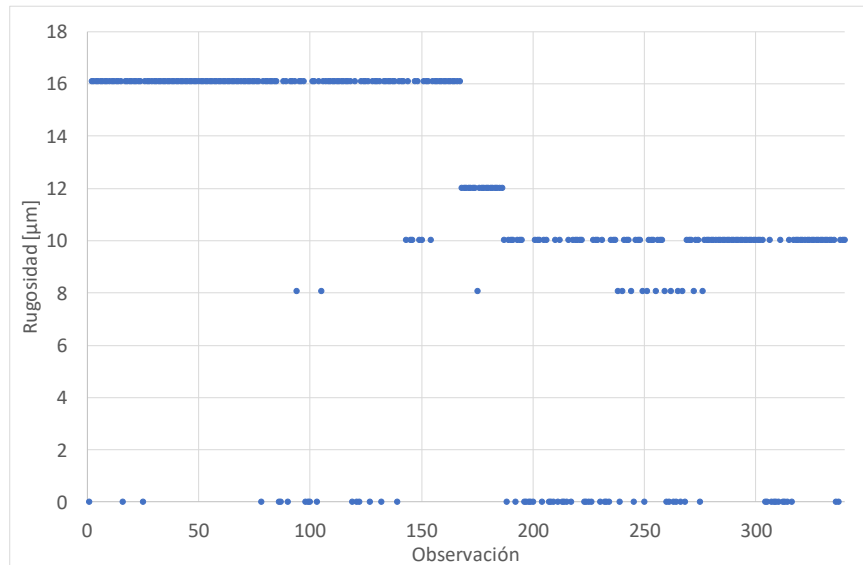


Figura 16 Cambio de velocidad de avance de 10 m/min a 6 m/min

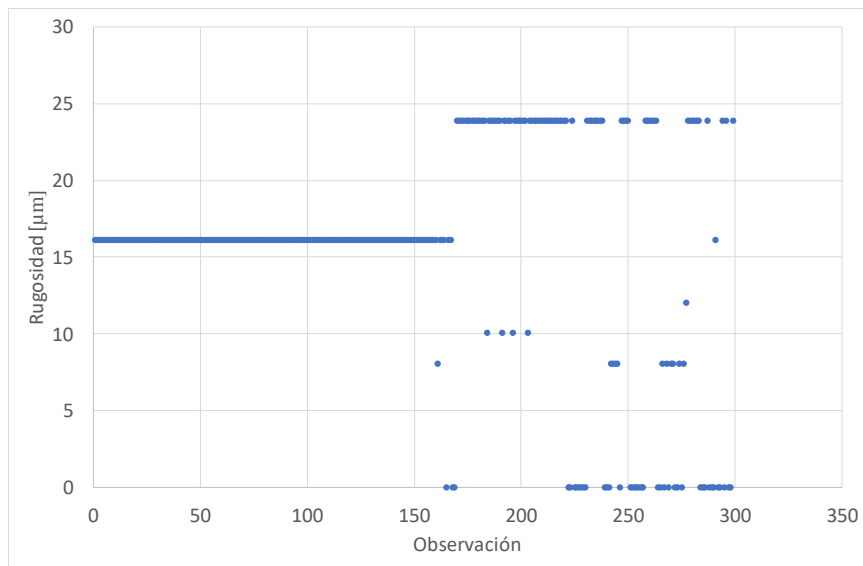


Figura 17 Cambio de velocidad de avance de 10 m/min a m/min

6.2. Rango de parámetros de corte

Para identificar los parámetros de corte necesarios para que el sistema sea válido, se realizaron pruebas modificando la velocidad del husillo, y se realizó la comparación de los posibles resultados en la rugosidad del material. Sin embargo, se debe tener en cuenta que el mecanizado se realizó con la herramienta HSS, por esta razón fue necesario hacer la traslación para ajustar la curva a la que se obtendría en caso de utilizar la herramienta HSS Co. El efecto por el cambio de velocidad de husillo se puede observar en la Figura 18 en donde se evidencia una pendiente en la rugosidad, al modificar la velocidad de husillo, por esta razón no es posible asegurar un valor de rugosidad al modificar la velocidad de husillo, ya que la distancia entre las marcas cambia lo que implica un cambio de del patrón y de rugosidad.

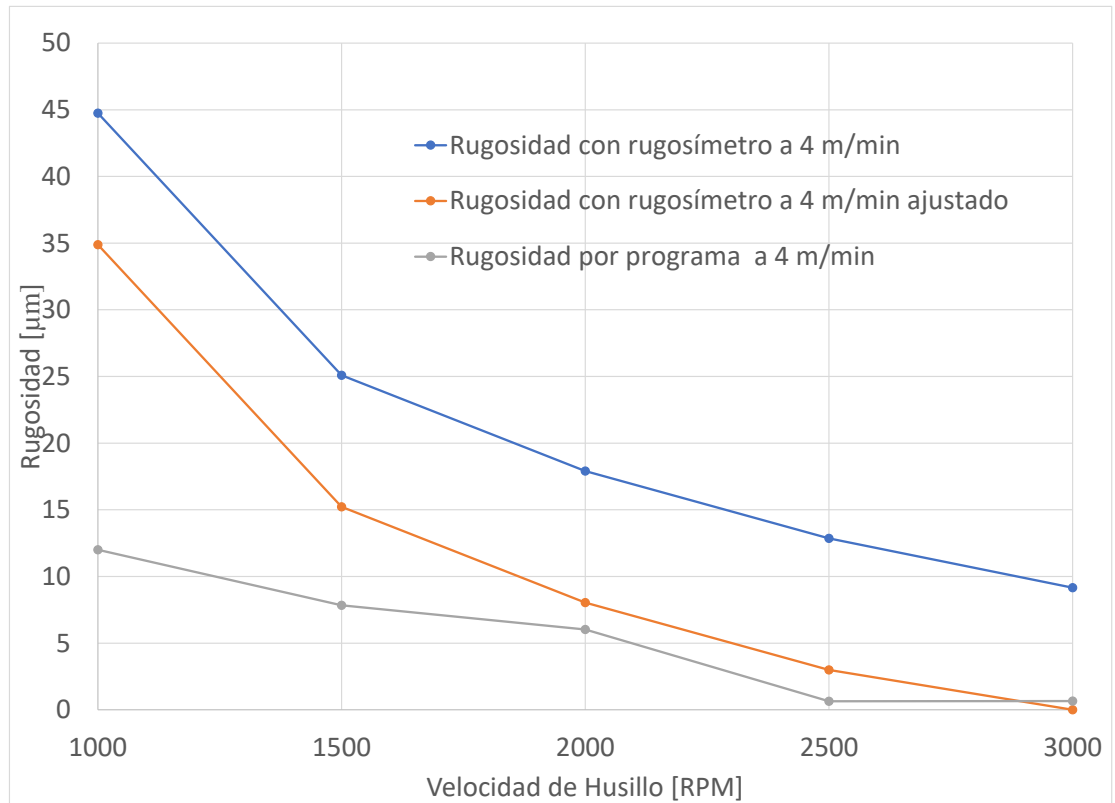


Figura 18 Efecto del cambio de velocidad de husillo

Al identificar las posibles variaciones en los parámetros de corte que pueden generarse en el mecanizado, incluyendo velocidad de husillo, velocidad de avance, número de dientes y herramienta; podemos concluir que para que el sistema de control de calidad proporcione el valor de rugosidad real, el mecanizado debe tener las siguientes características.

Tabla 4 Parámetros de corte de sistema de control de calidad

Característica	Descripción
Velocidad de husillo	2000 RPM
Velocidad de avance	{4 m/min 6 m/min 8 m/min 10 m/min 12 m/min}
Número de dientes	2
Herramienta	HSS Co 15

6.3. Viabilidad del sistema

A continuación, se presentan los resultados después de analizar una muestra de 600 datos por cada velocidad de avance, usando la herramienta HSS Co.

Tabla 5 Porcentaje de aciertos con herramienta HSS Co

Velocidad de avance	4 m/min	6 m/min	8 m/min	10 m/min	12 m/min
Porcentaje de aciertos	90.000%	99.667%	84.000%	86.333%	100.000%

Se puede concluir, que utilizando una herramienta HSS Co, el sistema funciona correctamente con una confiabilidad del 84% en el peor de los casos que es con una velocidad de avance de 8 m/min. Adicionalmente, se muestra la anterior tabla discriminada por: número de aciertos, número de falsos positivos y número de errores en el procesamiento.

Tabla 6. Número de aciertos, falsos positivos y errores con HSS Co

	40	60	80	100	120
Número de aciertos	540	598	504	518	600
Número de Falsos positivos	36	2	15	1	0
Número de errores	24	0	81	81	0

Partiendo de la anterior tabla, se puede observar cuales de los 600 datos logra observar el sistema de visión, cuales son falsos positivos y cuales son errores, demostrando así la confiabilidad del proceso. Es claro aclarar, que dichas pruebas se hicieron con 5 muestras cada una de 600 datos, la anterior tabla muestra el peor caso de las muestras analizadas.

A continuación, se presentan los resultados después de analizar una muestra de 600 datos por cada velocidad de avance, usando la herramienta HSS.

Tabla 7 Porcentaje de aciertos con herramienta HSS Co

Velocidad de avance	4 m/min	6 m/min	8 m/min	10 m/min	12 m/min
Porcentaje de aciertos	76%	100%	100%	90%	95%

Se puede concluir, que utilizando una herramienta HSS, sin tener en cuenta el traslado de la curva de rugosidad y haciendo una identificación del patrón, el sistema funciona correctamente con una confiabilidad del 76.17% en el peor de los casos que es con una velocidad de avance de 9.6 m/min. Sin embargo, cabe resaltar que usando esta herramienta se puede observar que se comporta correctamente en las velocidades de 14,4 m/min y 19,2 m/min. Adicionalmente, se muestra la anterior tabla discriminada por: número de aciertos, número de falsos positivos y número de errores en el procesamiento.

Tabla 8. Número de aciertos con herramienta HSS

	40	60	80	100	120
Número de aciertos	452	600	600	542	569
Número de Falsos positivos	0	0	0	58	14
Número de errores	148	0	0	0	17

Partiendo de la anterior tabla, se puede observar cuales de los 600 datos logra observar el sistema de visión, cuales son falsos positivos y cuales son errores, demostrando así la confiabilidad del proceso. Es claro aclarar, que dichas pruebas se hicieron con 5 muestras cada una de 600 datos, la anterior tabla muestra el peor caso de las muestras analizadas.

A partir de estos resultados se puede concluir que el uso del programa es viable mientras se mantengan las condiciones de mecanizado estipuladas en un inicio y teniendo en cuenta los límites de velocidades, material, herramienta y configuración de la cámara. Con estos parámetros definidos, el sistema es capaz de detectar errores inesperados del mecanizado como el movimiento del material por falta de ajuste al prensar y la fractura de herramienta por desgaste o golpe inesperado. Así mismo, como en procesos de acabado poder asegurar uniformidad en el proceso o la visualización de los defectos a lo largo del proceso y como corregirlos.

Teniendo en cuenta lo anterior, es necesario ver el impacto que puede tener este algoritmo en la industria, este análisis se realiza de manera cualitativa, debido a que cada industria maneja datos diferentes y no se puede asegurar un solo valor general. Es por esto, que la implementación de este algoritmo en la industria trae un impacto ambiental y financiero, debido a que cumple con su objetivo de reducir producto no conforme, lo cual genera una disminución de costos de producción (Hora hombre, hora máquina, insumos, entre otros) y una disminución de desperdicios de material. Es claro resaltar, que dicho algoritmo presenta una disminución en los productos no conforme y de los desperdicios generados a partir de estos, esto incluye el material en que se

realiza la pieza, los lubricantes utilizados, el desgaste de la herramienta, recursos indirectos y los factores de producción mencionados anteriormente, es por esto, que con este algoritmo se puede observar un impacto financiero y ambiental, para la empresa que lo aplique, dicho impacto puede variar dependiendo de cada industria.

7. Conclusiones y recomendaciones.

Las operaciones en donde es viable el sistema de control de calidad corresponden a un mecanizado frontal con herramienta plana en donde se mantengan las condiciones del protocolo de prueba, esto permite general el patrón circular que el sistema es capaz de detectar.

Al realizar un cambio de herramienta, la rugosidad superficial se traslada, sin embargo, el patrón visualizado se mantiene constante, esto refleja un cambio de altura de la veta con el cambio de la herramienta.

Por medio de este trabajo de grado, se concluye que la confiabilidad del código realizado es del 84% en el peor de los casos con una herramienta de HSS Co y una confiabilidad del 76.17% en el peor de los casos usando una herramienta HSS.

Es importante tener en cuenta que las operaciones en donde es válido el sistema son: fresado convencional, parcial, terminal y de cavidades. Sin embargo, para que el sistema opere de manera correcta se debe cumplir con las condiciones de mecanizado como la iluminación, la distancia de la cámara a la superficie de mecanizado, y se debe asegurar que solo se realicen mecanizados de derecha a izquierda y en línea recta, esto último debido a que la cámara se encuentra situada a la derecha del husillo, lo que permite visualizar la sección mecanizada en un menor tiempo debido a la cercanía.

A partir de los análisis realizados, se concluye que la velocidad de husillo en la cual se debe operar el sistema es de 2000 rpm, debido a que, si se varía dicho valor, cambian los patrones dejados en mecanizado y por ende no se tendrá la misma confiabilidad de resultado.

Por medio del análisis hecho en la medida de variaciones de velocidad de avance a lo largo del material, se concluye que el sistema es robusto para identificar dichas variaciones, así como puede seguir funcionando en casos de cambio de herramienta, aunque su nivel de confiabilidad se puede ver comprometido.

Se recomienda que la instalación del computador que realiza el control de calidad se encuentre en un espacio alejado del centro de mecanizado, esto permite reducir posiciones anti ergonómicas que afecten al operario. Además de permitir un punto de control fuera del proceso.

Se recomienda el uso de herramientas de cuerpo entero de 16 mm de diámetro debido a que estas generan un mejor acabado que las herramientas de plaquitas.

Comprobar la iluminación necesaria en máquina, con el fin de identificar correctamente los patrones, teniendo en cuenta que, este factor es crucial para el funcionamiento del sistema.

8. Investigaciones futuras

Se propone como futura mejora del algoritmo, poder implementar un control automático a la velocidad de avance, con el fin, de cuando la respuesta del sistema en la acción a tomar sea de subida o bajada, la máquina pueda realizarlo sola, sin contar con un operario para realizar la corrección, esto eliminaría un error humano y mejoraría la confiabilidad del algoritmo debido a que se haría de forma automática.

Se propone una implementación con una segunda cámara re direccionada de forma angular, con el fin de que pueda observar en el momento exacto cuando el escariador realiza el corte, esto eliminaría el retardo que se puede presentar en línea debido al montaje y ubicación de la cámara dentro del centro de mecanizado.

Se propone un cambio de cámara y lente que permita obtener imágenes con mayor resolución para identificar la rugosidad superficial con valores de velocidad de avance inferiores a 4 m/min.

Realizar un clasificador adicional para cuando existen variaciones de velocidad de husillo, esto con el fin de generar un código más robusto y ampliar el rango de parámetros de corte.

9. Glosario

Procesamiento de Imágenes: “Es un conjunto de técnicas que operan sobre la representación digital de una imagen, a objeto de destacar algunos de los elementos que conforman la escena, de modo que se facilite su posterior análisis, bien sea por parte de un usuario (humano) o un sistema de visión artificial” [18].

Rugosidad: “Se refiere a desviaciones pequeñas con respecto a la superficie nominal finamente espaciadas que vienen determinadas por las características del material y los procesos que formaron la superficie” [19].

Rugosidad superficial: Rugosidad real de la superficie, esta se calcula a partir de la media aritmética de las desviaciones de la superficie [19].

CNC (control numérico computarizado): “Es un medio sofisticado y muy versátil para controlar los dispositivos mecánicos, que ha conducido al desarrollo de máquinas herramienta capaces de ciclos de maquinado y formas geométricas más complejas y a niveles más altos de operación automática que las máquinas de tomillos convencionales y las máquinas de mandril” [19].

Centro de Mecanizado: Es una máquina altamente automatizada capaz de realizar múltiples operaciones de maquinado en una instalación bajo CNC (control numérico computarizado) con la mínima intervención humana. Las operaciones típicas son aquellas que usan herramientas de corte rotatorio, como los cortadores y las brocas [19].

Escariador: Herramienta con varios filos de corte, rectos o helicoidales, elimina muy poco material [20].

Velocidad de Avance (F): Es la velocidad relativa que existe entre la pieza a maquinar y la herramienta de corte, se puede decir que es la velocidad con la que el corte avanza o progresa a lo largo del material [21].

Velocidad de Husillo: “Rapidez de rotación de un motor, husillo u otro sistema mecánico giratorio, Rev./min; subíndice en algunas ecuaciones” [19].

Velocidad de Corte (Vc): “Es la velocidad que existe entre la pieza de trabajo y el filo cortante de la herramienta” [21].

HSS: escariador de alta velocidad.

HSS Co: Escariador de alta velocidad de acero rápido al cobalto.

10. Tabla de Anexos o Apéndices

No. Anexo	Nombre	Desarrollo	Tipo de Archivo	Enlace corto (https://goo.gl/)	Relevancia para el documento (1-5)
A	Planos soporte cámara	Propio	PDF	Enlace al archivo en su carpeta de Google Drive	2

11. Referencias

- [1] M. Paredes Forero and J. D. Henao Tovar, "Sistema de control de calidad por procesamiento de imágenes." 20-May-2016.
- [2] F. G. Fraile, J. F. V. Barrio, and M. T. Monzón, *Seis sigma*. FC Editorial, 2003.
- [3] S. Luis, "Lean Manufacturing pasó a pasó," *México Grupo Editor. Norma*, 2008.
- [4] M. Correa, M. de J. Ramírez, J. R. Alique, C. A. Rodríguez, and others, "Factores que afectan el acabado superficial en los procesos de mecanizado: Técnicas de análisis y modelos," *XXV Jorn. Automática*, 2004.
- [5] E. I. M. Haro, "Recuperacion de aceites usados," *Cienc. Unemi*, vol. 1, no. 2, pp. 16–21, 2015.
- [6] S. L. García Rodríguez and B. C. R. Leguisamo, "Estudio de la eficiencia de herramientas recubiertas con Nitruro de Titanio con respecto a la vida útil de la herramienta y acabado superficial," Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, 2015.
- [7] M. Correa Valencia, "Inteligencia artificial para la predicción y control del acabado superficial en procesos de fresado a alta velocidad," phd, Facultad de Informática (UPM), 2010.
- [8] M. R. Manrique Torres, "Visión artificial para medir la rugosidad superficial en función de los parámetros de corte.," Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla, Puebla, México, 2015.
- [9] A. Bhaskar, A. Vaidya, M. S. Amrutkar, and N. Y. Bagrecha, "Qcuip: Quality Control Using Image Processing," *ijera*, vol. 4, pp. 15–18, Mar. 2014.
- [10] Yolanda González Cid, "Aplicaciones de la visión artificial.," no. Material del curso: Visión industrial.
- [11] A. G. D. Torres, "Visión y procesamiento de imágenes para control de calidad," *Rev. Univ. EAFIT*, vol. 32, no. 103, pp. 47–64, 2012.
- [12] M. P. Groover, *Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes, and systems*, 4th ed. Hoboken, NJ: J. Wiley & Sons, 2011.
- [13] T. Alatalo, "Evolución de las herramientas de fresado," *Tope, tecnología para la fabricación mecánica*. [Online]. Available: http://www.revistatope.com/196_art_SECO_TOOLS_Fresadoras.html. [Accessed: 14-Apr-2017].
- [14] I. Buj-Corral, J. Vivancos-Calvet, and H. González-Rojas, "Influence of feed, eccentricity and helix angle on topography obtained in side milling processes," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 51, no. 12, pp. 889–897, Diciembre 2011.
- [15] Das, "54. End mill helix angle selection," *CNC etc*, 17-Nov-2015. [Online]. Available: <http://cadem.com/cncetc/cnc-milling-end-mill-helix/>. [Accessed: 15-Apr-2017].
- [16] "Fresas enterizas.- Procesos de mecanizado por arranque de viruta.," *Instituto de formación profesional a distancia ILHI*. [Online]. Available: http://ikastaroak.ulhi.net/edu/es/PPFM/DPMCM/DPMCM01/es_PPFM_DPMCM01_Contenidos/webseite_345_fresas_enterizas.html. [Accessed: 15-Apr-2017].
- [17] "ISO - International Organization for Standardization," *ISO*. [Online]. Available: <http://www.iso.org/iso/home.html>. [Accessed: 29-Aug-2016].
- [18] R. Medina and J. Bellera, "Bases del Procesamiento de Imágenes Médicas," *Línea Available Httpwww Saber Ula VeredtelemedicinaTallerTelemedicinajbellera-01 PdfÚltimo Acceso 26 01 2015*, 1997.
- [19] M. P. Groover, *Fundamentos de manufactura moderna: materiales, procesos y sistemas*. Pearson Educación, 1997.
- [20] S. R. Schmid, *Manufactura, ingeniería y tecnología*. Pearson Educación, 2002.
- [21] D. F. Bueno Guapacha and J. S. González Vargas, "Guía de aprendizaje para manejo de torno CNC Wabeco CC-D6000 E." Ingeniería mecatrónica por ciclos, 2015.
- [22] G. Zhang and S. To, "A novel surface quality evaluation method in ultra-precision raster milling using cutting chips," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 219, pp. 328–338, May 2015.
- [23] R. Teti, P. Bosetti, M. Leonesio, and P. Parenti, "Eighth CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering On Development of an Optimal Control System for Real-time Process Optimization on Milling Machine Tools," *Procedia CIRP*, vol. 12, pp. 31–36, Enero 2013.
- [24] F. E. López Guerrero, R. Cavazos Flores, and M. Delgado Acosta, "Caracterización de superficies maquinadas por medio de parámetros de rugosidad," *Ingenierías*, vol. 6, no. 18, pp. 62–68, 2003.

ANEXO 2

**CARTA DE AUTORIZACIÓN DE LOS AUTORES
(Licencia de uso)**

Bogotá, D.C., 23 de abril de 2017

Señores
Biblioteca Alfonso Borrero Cabal S.J.
Pontificia Universidad Javeriana
Cuidad

Los suscritos:

Melissa Paredes Forero, con C.C. No 1020767884
Juan David Henao Tovar, con C.C. No 1018477804

En mi (nuestra) calidad de autor (es) exclusivo (s) de la obra titulada:
Sistema de Control de calidad en fresado por escariador a partir de la visión artificial

(por favor señale con una "x" las opciones que apliquen)
Tesis doctoral Trabajo de grado Premio o distinción: Si No
cual:

presentado y aprobado en el año 2017, por medio del presente escrito autorizo (autorizamos) a la Pontificia Universidad Javeriana para que, en desarrollo de la presente licencia de uso parcial, pueda ejercer sobre mi (nuestra) obra las atribuciones que se indican a continuación, teniendo en cuenta que en cualquier caso, la finalidad perseguida será facilitar, difundir y promover el aprendizaje, la enseñanza y la investigación.

En consecuencia, las atribuciones de usos temporales y parciales que por virtud de la presente licencia se autorizan a la Pontificia Universidad Javeriana, a los usuarios de la Biblioteca Alfonso Borrero Cabal S.J., así como a los usuarios de las redes, bases de datos y demás sitios web con los que la Universidad tenga perfeccionado un convenio, son:

AUTORIZO (AUTORIZAMOS)	SI	NO
1. La conservación de los ejemplares necesarios en la sala de tesis y trabajos de grado de la Biblioteca.	X	
2. La consulta física (sólo en las instalaciones de la Biblioteca)	X	
3. La consulta electrónica - on line (a través del catálogo Biblos y el Repositorio Institucional)	X	
4. La reproducción por cualquier formato conocido o por conocer	X	
5. La comunicación pública por cualquier procedimiento o medio físico o electrónico, así como su puesta a disposición en Internet	X	
6. La inclusión en bases de datos y en sitios web sean éstos onerosos o gratuitos, existiendo con ellos previo convenio perfeccionado con la Pontificia Universidad Javeriana para efectos de satisfacer los fines previstos. En este evento, tales sitios y sus usuarios tendrán las mismas facultades que las aquí concedidas con las mismas limitaciones y condiciones	X	

De acuerdo con la naturaleza del uso concedido, la presente licencia parcial se otorga a título gratuito por el máximo tiempo legal colombiano, con el propósito de que en dicho lapso mi (nuestra) obra sea explotada en las condiciones aquí estipuladas y para los fines indicados, respetando siempre la titularidad de los derechos patrimoniales y morales correspondientes, de acuerdo con los usos honrados, de manera proporcional y justificada a la finalidad perseguida, sin ánimo de lucro ni de comercialización.

De manera complementaria, garantizo (garantizamos) en mi (nuestra) calidad de estudiante (s) y por ende autor (es) exclusivo (s), que la Tesis o Trabajo de Grado en cuestión, es producto de mi (nuestra) plena autoría, de mi (nuestro) esfuerzo personal intelectual, como consecuencia de mi (nuestra) creación original particular y, por tanto, soy (somos) el (los) único (s) titular (es) de la misma. Además, aseguro (aseguramos) que no contiene citas, ni transcripciones de otras obras protegidas, por fuera de los límites autorizados por la ley, según los usos honrados, y en proporción a los fines previstos; ni tampoco contempla declaraciones difamatorias contra terceros; respetando el derecho a la imagen, intimidad, buen nombre y demás derechos constitucionales. Adicionalmente, manifiesto (manifestamos) que no se incluyeron expresiones contrarias al orden público ni a las buenas costumbres. En consecuencia, la responsabilidad directa en la elaboración, presentación, investigación y, en general, contenidos de la Tesis o Trabajo de Grado es de mí (nuestro) competencia exclusiva, eximiendo de toda responsabilidad a la Pontificia Universidad Javeriana por tales aspectos.

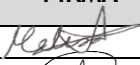

Sin perjuicio de los usos y atribuciones otorgadas en virtud de este documento, continuare (continuaremos) conservando los correspondientes derechos patrimoniales sin modificación o restricción alguna, puesto que de acuerdo con la legislación colombiana aplicable, el presente es un acuerdo jurídico que en ningún caso conlleva la enajenación de los derechos patrimoniales derivados del régimen del Derecho de Autor.

De conformidad con lo establecido en el artículo 30 de la Ley 23 de 1982 y el artículo 11 de la Decisión Andina 351 de 1993, “*Los derechos morales sobre el trabajo son propiedad de los autores*”, los cuales son irrenunciables, imprescriptibles, inembargables e inalienables. En consecuencia, la Pontificia Universidad Javeriana está en la obligación de RESPETARLOS Y HACERLOS RESPETAR, para lo cual tomará las medidas correspondientes para garantizar su observancia.

NOTA: Información Confidencial:

Esta Tesis o Trabajo de Grado contiene información privilegiada, estratégica, secreta, confidencial y demás similar, o hace parte de una investigación que se adelanta y cuyos resultados finales no se han publicado. Si No

En caso afirmativo expresamente indicaré (indicaremos), en carta adjunta, tal situación con el fin de que se mantenga la restricción de acceso.

NOMBRE COMPLETO	No. del documento de identidad	FIRMA
Melissa Paredes Forero	1020767884	
Juan David Henao Tovar	1018477804	

FACULTAD: Ingeniería

PROGRAMA ACADÉMICO: Ingeniería Industrial

ANEXO 3
BIBLIOTECA ALFONSO BORRERO CABAL, S.J.
DESCRIPCIÓN DE LA TESIS O DEL TRABAJO DE GRADO
FORMULARIO

TÍTULO COMPLETO DE LA TESIS DOCTORAL O TRABAJO DE GRADO						
Sistema de Control de calidad en fresado por escariador a partir de la visión artificial						
SUBTÍTULO, SI LO TIENE						
AUTOR O AUTORES						
Apellidos Completos			Nombres Completos			
Paredes Forero			Melissa			
Henao Tovar			Juan David			
DIRECTOR (ES) TESIS O DEL TRABAJO DE GRADO						
Apellidos Completos			Nombres Completos			
Manrique Torres			Martha Ruth			
Mondragón Bernal			Ivan Fernando			
FACULTAD						
Ingeniería						
PROGRAMA ACADÉMICO						
Tipo de programa (seleccione con "x")						
Pregrado	Especialización	Maestría	Doctorado			
X						
Nombre del programa académico						
Ingeniería industrial						
Nombres y apellidos del director del programa académico						
David Barrera Ferro						
TRABAJO PARA OPTAR AL TÍTULO DE:						
Ingeniero/a Industrial						
PREMIO O DISTINCIÓN (En caso de ser LAUREADAS o tener una mención especial):						
CIUDAD		AÑO DE PRESENTACIÓN DE LA TESIS O DEL TRABAJO DE GRADO			NÚMERO DE PÁGINAS	
Bogotá		2017			25	
TIPO DE ILUSTRACIONES (seleccione con "x")						
Dibujos	Pinturas	Tablas, gráficos y diagramas	Planos	Mapas	Fotografías	Partituras
		x	x			
SOFTWARE REQUERIDO O ESPECIALIZADO PARA LA LECTURA DEL DOCUMENTO						
<p>Nota: En caso de que el software (programa especializado requerido) no se encuentre licenciado por la Universidad a través de la Biblioteca (previa consulta al estudiante), el texto de la Tesis o Trabajo de Grado quedará solamente en formato PDF.</p>						

MATERIAL ACOMPAÑANTE					
TIPO	DURACIÓN (minutos)	CANTIDAD	FORMATO		
			CD	DVD	Otro ¿Cuál?
Vídeo					
Audio					
Multimedia					
Producción electrónica					
Otro Cuál?					
DESCRIPTORES O PALABRAS CLAVE EN ESPAÑOL E INGLÉS					
Son los términos que definen los temas que identifican el contenido. (En caso de duda para designar estos descriptores, se recomienda consultar con la Sección de Desarrollo de Colecciones de la Biblioteca Alfonso Borrero Cabal S.J en el correo biblioteca@javeriana.edu.co , donde se les orientará).					
ESPAÑOL			INGLÉS		
Visión artificial			Artificial vision		
Rugosidad			Roughness		
CNC			CNC		
Fresado			Milling		
RESUMEN DEL CONTENIDO EN ESPAÑOL E INGLÉS (Máximo 250 palabras - 1530 caracteres)					
<p>El control de calidad es una de las áreas más importantes dentro de las empresas, ya que es por medio de este que se verifica que el cliente va a recibir un producto en excelentes condiciones. Teniendo en cuenta lo anterior, en el presente trabajo de grado se encontró la propuesta de un sistema de control de calidad manual, enfocado a industrias que hacen uso de centros de mecanizados para el proceso de acabado en metales. Para el desarrollo de este, se utilizó el procesamiento de imágenes para identificar la rugosidad y reducir productos no conformes en dichas industrias.</p> <p>Este sistema de control de calidad utilizó el código realizado en el trabajo de grado llamado "Sistema de control de calidad por procesamiento de imágenes" realizado por los autores para medir la rugosidad superficial. A partir de los datos recolectados, calibración y modificaciones necesarias se integró dicho código a la máquina EMCO MILL 450 para realizar el monitoreo del proceso.</p> <p>Quality control is one of the most important areas within companies, this area is in charged in verifying that the customer will receive a product in excellent conditions. Considering this, in the present work was found the proposal of a manual quality control system, focused on industries that make use of machining centers for the metal finishing process. For the development of this, the image processing was used to identify the roughness and reduce nonconforming products in these industries.</p> <p>This system of quality control used the code made in the work of degree called "System of control of quality by processing of images" realized by the authors to measure the surface roughness. From the collected data, calibration and necessary modifications this code was integrated to the machine EMCO MILL 450 to carry out the monitoring of the process.</p>					