

**DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS PARA LA OPERACIÓN DE CILINDRADO
DE ACERO SAE12L 14, BRONCE SAE40 Y ALUMINIO SAE 1060 EN EL
TORNO *PC TURN 125* POR MEDIO DE UNA METODOLOGÍA EXPERIMENTAL**

DARÍO ANDRÉS MORALES VILLAMIL

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA
FACULTAD DE INGENIERIA
INGENIERÍA INDUSTRIAL
BOGOTÁ
2009**

**DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS PARA LA OPERACIÓN DE CILINDRADO
DE ACERO SAE12L 14, BRONCE SAE40 Y ALUMINIO SAE 1060 EN EL
TORNO *PC TURN 125* POR MEDIO DE UNA METODOLOGÍA EXPERIMENTAL**

DARÍO ANDRÉS MORALES VILLAMIL

Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero Industrial

**DIRECTORA
MARTHA RUTH MANRIQUE**

**CO-DIRECTOR
GABRIEL ZAMBRANO**

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA
FACULTAD DE INGENIERIA
INGENIERÍA INDUSTRIAL
BOGOTÁ
2009**

AGRADECIMIENTOS

A Martha Ruth Manrique por su colaboración, apoyo y asesoramiento como directora del proyecto.

A Gabriel Zambrano por su colaboración, apoyo y asesoramiento como co-director del proyecto.

A Deivy Durán, Wilson Hernández, Ray Bello y Sergio González por su colaboración, apoyo y suministro de materiales.

DEDICATORIA

**A mí familia por el esfuerzo, apoyo y comprensión
que me han brindado durante todo este tiempo.**

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN EJECUTIVO	12
INTRODUCCION.....	13
1. TÍTULO.....	14
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	14
2.1 ANTECEDENTES.....	14
2.2 FORMULACIÓN	16
3. JUSTIFICACIÓN	17
4. MARCO TEÓRICO.....	18
4.1 MATERIALES PARA MECANIZADO	18
4.2 MATERIAL DE LA HERRAMIENTA	19
4.3 CARACTERÍSTICAS DEL PROCESO	19
4.4 PARÁMETROS DE CORTE	23
4.5 ESTUDIO DE IMÁGENES	23
4.5.1 ANALISIS DE IMÁGENES	24
5. OBJETIVO GENERAL	25
6. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	25
7. TÉCNICAS DEL DISEÑO DEL EXPERIMENTO	26
7.1 DISEÑO DEL EXPERIMENTO (DDE).....	26
7.2 REDES NEURONALES.....	27
8. DETALLES DEL EXPERIMENTO	29
8.1 MATERIALES Y HERRAMIENTAS UTILIZADAS	29
8.1.1 MATERIALES DE TRABAJO.....	29
8.1.2 HERRAMIENTAS DE TRABAJO	30
8.1.3 MÁQUINA	31
8.2 CONDICIONES DEL EXPERIMENTO	31
8.2.1 CATEGORIZACIÓN DE CALIDAD SUPERFICIAL.....	33
8.2.2 PROGRAMACIÓN DE TORNO <i>EMCO PC TURN 125</i>	35
8.2.3 PROGRAMACION RED NEURONAL.....	37

9. DESARROLLO DEL EXPERIMENTO.....	39
9.1 PRUEBA DE VIRUTA.....	39
9.2 PRUEBAS DE MEJORAMIENTO.....	41
9.2.1 MEJORAMIENTO DESBASTE	41
9.2.2 MEJORAMIENTO ACABADO.....	45
9.3 DISEÑO EXPERIMENTAL 3º.....	49
9.3.1 PRUEBAS DE DESBASTE.....	51
9.3.2 PRUEBAS DE ACABADO.....	58
10. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS CATEGORIZACIÓN DE MATERIALES.....	64
10.1 CATEGORIZACIÓN DESBASTE	64
10.2 CATEGORIZACIÓN ACABADO.....	79
11. RESULTADOS RED NEURONAL.....	93
12. CONCLUSIONES.....	98
13. RECOMENDACIONES	100
14. REFERENCIAS.....	101
14.1 EXPERTOS	103
ANEXOS	104

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Datos de producción de materiales seleccionados de manufactura	18
Tabla 2: Propiedades del Acero SAE 12L14.....	29
Tabla 3: Propiedades del Bronce SAE 40.....	29
Tabla 4: Propiedades del Aluminio SAE 1060.....	30
Tabla 5: Propiedades físicas del inserto.	30
Tabla 6: Especificaciones Torno EMCO PC TURN 125.....	31
Tabla 7: Características de la viruta. Aluminio.	39
Tabla 8: Características de la viruta. Bronce.....	40
Tabla 9: Características de la viruta. Acero.....	41
Tabla 10: Pruebas de desbaste de aluminio.	53
Tabla 11: Pruebas de desbaste de bronce.....	54
Tabla 12: Pruebas de desbaste de acero.	55
Tabla 13: Pruebas de acabado de aluminio.	59
Tabla 14: Pruebas de acabado de bronce.	60
Tabla 15: Pruebas de acabado de acero.	61
Tabla 16: Resultados Calibrador. Medidas Ascendentes.....	104
Tabla 17: Datos de entrenamiento. Red Neuronal de Desbaste.....	122
Tabla 18: Datos de prueba. Red Neuronal de Desbaste.....	123
Tabla 19: Datos de entrenamiento. Red Neuronal de Desbaste Acero y Bronce.	125
Tabla 20: Datos de prueba. Red Neuronal de Desbaste Acero y Bronce.	126
Tabla 21: Datos de entrenamiento. Red Neuronal de Desbaste Aluminio.....	127
Tabla 22: Datos de prueba. Red Neuronal de Desbaste Aluminio.....	128
Tabla 23: Datos de entrenamiento. Red Neuronal de Acabado.....	130
Tabla 24: Datos de entrenamiento. Red Neuronal de Acabado.....	131

INDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1: Imagen procesada de aluminio de calidad “Baja”*. En desbaste.	65
Gráfica 2: Imagen procesada de aluminio de calidad “Media”*. En desbaste.....	67
Gráfica 3: Imagen procesada de aluminio de calidad “Alta”*. En desbaste.	68
Gráfica 4: Imagen procesada de bronce de calidad “Baja”*. En desbaste.....	70
Gráfica 5: Imagen procesada de bronce de calidad “Media”*. En desbaste.	72
Gráfica 6: Imagen procesada de bronce de calidad “Alta”*. En desbaste.....	74
Gráfica 7: Imagen procesada de acero de calidad “Baja”*. En desbaste.....	75
Gráfica 8: Imagen procesada de acero de calidad “Media”*. En desbaste.	77
Gráfica 9: Imagen procesada de acero de calidad “Alta”*. En desbaste.....	78
Gráfica 10: Imagen procesada de aluminio de calidad “Baja”*. En acabado.	80
Gráfica 11: Imagen procesada de aluminio de calidad “Media”*. En acabado.....	81
Gráfica 12: Imagen procesada de aluminio de calidad “Alta”*. En acabado.	83
Gráfica 13: Imagen procesada de bronce de calidad “Baja”*. En acabado.....	84
Gráfica 14: Imagen procesada de bronce de calidad “Media”*. En acabado.	86
Gráfica 15: Imagen procesada de bronce de calidad “Alta”*. En acabado.....	87
Gráfica 16: Imagen procesada de acero de calidad “Baja”*. En acabado.....	89
Gráfica 17: Imagen procesada de acero de calidad “Media”*. En acabado.....	90
Gráfica 18: Imagen procesada de acero de calidad “Alta”*. En acabado.....	92
Gráfica 19: Datos Predichos vs Datos Esperados. Bronce y Acero*.	94
Gráfica 20: Datos Predichos vs Datos Esperados*. Aluminio.	95
Gráfica 21: Datos Predichos vs Datos Esperados*. Proceso de acabado.....	97
Gráfica 22: Datos Predichos vs Datos Esperados. Bronce, Acero y Aluminio. Proceso de desbaste.....	124
Gráfica 23: Datos Predichos vs Datos Esperados. Bronce, Acero y Aluminio. Proceso de acabado.....	129

INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Partes herramientas de corte.....	20
Figura 2: Proceso de formación de la viruta.....	21
Figura 3: Resistencia relativa de arista y tendencia al desportillamiento y rotura de insertos de diversas formas.....	22
Figura 4: Estructura de una red neuronal.....	28
Figura 5: Diagrama de Bloque para el proceso de caracterización de calidad superficial.....	34
Figura 6: Diagrama de Bloque para el proceso de desbaste y acabado.....	36
Figura 7: Diagrama de Bloque para el proceso de entrenamiento y prueba de RN.....	38
Figura 8: Combinatoria 3^3 (3 Factores – 3 Niveles).....	50
Figura 9. Selección de líneas.....	64
Figura 10. Análisis de Superficies.....	64
Figura 11: Amplitud de líneas.....	69
Figura 12: Red neuronal para acero y bronce. Desbaste.....	94
Figura 13: Red neuronal para aluminio. Desbaste.....	95
Figura 14: Red neuronal para aluminio. Desbaste.....	96
Figura 15: Edición de un programa en el torno Emco PC Turn 125.....	120
Figura 16: Flujograma Edición programa en el torno Emco PC Turn 125.....	121

INDICE DE IMÁGENES

Imagen 1. Superficie Aluminio. Avance 0.2mm/rev.....	42
Imagen 2. Aluminio con deformación superficial.....	43
Imagen 3. Superficie Bronce. (a) Avance de 0.44mm/rev (b) Avance de 0.3mm/rev	44
Imagen 4. Superficie Acero (a) Avance 0.44mm/rev (b) Avance 0.3mm/rev	45
Imagen 5. Acabado superficial de aluminio.....	46
Imagen 6. Acabado superficial de bronce.....	47
Imagen 7. Superficie de acero con discontinuidad en el acabado	48
Imagen 8. Acabado superficial de acero.....	48
Imagen 9. Aluminio de calidad “Baja”. En desbaste.....	66
Imagen 10: Aluminio de calidad “Media”. En desbaste.....	67
Imagen 11: Aluminio de calidad “Alta”. En desbaste.....	69
Imagen 12: Bronce de calidad “Baja”. En desbaste.....	71
Imagen 13: Bronce de calidad “Media”. En desbaste.....	73
Imagen 14: Bronce de calidad “Alta”. En desbaste.....	74
Imagen 15: Acero de calidad “Baja”. En desbaste.....	76
Imagen 16: Acero de calidad “Media”. En desbaste.....	77
Imagen 17: Acero de calidad “Alta”. En desbaste.....	79
Imagen 18: Aluminio de calidad “Baja”. En acabado.....	80
Imagen 19: Aluminio de calidad “Media”. En acabado.....	82
Imagen 20: Aluminio de calidad “Alta”. En acabado.....	83
Imagen 21: Bronce de calidad “Baja”. En acabado.....	85
Imagen 22: Bronce de calidad “Media”. En acabado.....	86
Imagen 23: Bronce de calidad “Alta”. En acabado.....	88
Imagen 24: Acero de calidad “Baja”. En acabado.....	89
Imagen 25: Acero de calidad “Media”. En acabado.....	91
Imagen 26: Acero de calidad “Media”. En acabado.....	92

INDICE DE FÓRMULAS

Fórmula 1.....23

RESUMEN EJECUTIVO

Este trabajo presenta los resultados obtenidos de una investigación experimental, en el torno Emco PC Turn 125, para determinar los parámetros de trabajo (profundidad de corte, avance, y velocidad del husillo) basándose en las calidades superficiales. Se llevaron a cabo pruebas de mejoramiento de los parámetros de corte para los procesos de desbaste y acabado para el Acero SAE 12L14, Aluminio SAE 1060 y Bronce SAE 40 de los parámetros de corte para los procesos de desbaste y acabado. Luego, se realizó un diseño experimental 3^3 , 3 factores con 3 niveles, para entrenar y probar una red neuronal Feedforward que prediga los resultados del acabado superficiales dentro de un rango de calidades Bajo, Medio o Alto, dados los parámetros de trabajo.

Se desarrolló y presentó un programa en Matlab® capaz de leer y procesar imágenes para que sean analizadas y categorizadas dentro de los rangos de calidades mencionados anteriormente; con el fin de apoyar la evaluación de superficies cuando es realizada por una persona no experta.

Los parámetros óptimos, dentro del marco del experimento, para el proceso de desbaste fueron de 0.2 – 0.3 mm/rev para el avance, la velocidad del husillo fue de 1.500rpm y la profundidad de corte fue de 0.5mm, para el acero, bronce y aluminio. Así mismo, se determinaron los valores óptimos en el proceso de acabado, los cuales estuvieron en un rango de 0.025mm/rev a 0.07mm/rev para el avance, de 1.500rpm a 3.000rpm para la velocidad del husillo y la profundidad de corte fue de 0.3mm para los materiales estudiados.

Finalmente, se determinaron 3 redes neuronales para la predicción de superficies con el fin de resolver problemas no lineales con efectividad y eficiencia, que tengan la posibilidad de ser integrados en un sistema de manufactura. Con base en los parámetros y datos mencionados anteriormente se desarrolló una red para el aluminio, en el proceso de desbaste, que cuenta con una capa oculta de 9 nodos y un nodo en la capa de salida. La segunda red que se entrenó fue para el acero y bronce con 2 capas ocultas de 2 y 8 nodos y una de salida con un nodo. La tercera red que se desarrolló fue para el proceso de acabado contando de los tres materiales, la cual se construyó con 2 capas ocultas de 2 y 6 nodos y una capa de salida con un nodo.

INTRODUCCION

En el transcurso de la historia se ha reconocido la importancia que tienen las diferentes variables involucradas en los procesos de mecanizado como por ejemplo los materiales de trabajo, las herramientas de corte y los parámetros tales como la profundidad de corte, el avance, la velocidad del husillo y la velocidad de corte, entre otros; debido a que la manufactura está en constante evolución y cada vez se busca mejorar los tiempos y minimizar los costos que están involucrados en éste tipo de procesos. Las máquinas de control numérico son un desarrollo enfocado a optimizar los tiempos de mecanizado buscando los mejores resultados posibles, y para contrarrestar los altos costos invertidos en éste tipo de máquinas, se debe hacer el uso más eficiente posible de éstas.

En los estudios realizados se han utilizado métodos experimentales para encontrar soluciones óptimas a los diferentes problemas de mecanizado. Algunos de los métodos estadísticos son las superficies de respuesta, que cuantifican y analizan las relaciones entre una o más variables para optimizar los resultados; el método Taguchi, que se basa en el análisis de factores con sus respectivos niveles para determinar las interrelaciones entre estos con técnicas estadísticas como la varianza y la desviación de la media cuadrada; y las redes neuronales, que se basan en el entrenamiento de una red de neuronas artificiales por medio de entradas (inputs) para predecir salidas (outputs). Estos métodos proveen una planeación y un análisis sistemático adecuado para tener resultados válidos y conclusiones objetivas.

El estudio que se llevará a cabo parte de métodos empíricos y estadísticos para desarrollar los objetivos del experimento, los cuales buscan determinar las condiciones apropiadas tanto de trabajo como de caracterización de materiales para conseguir los parámetros óptimos que den como resultado las mejores características superficiales en los procesos de desbaste y acabado.

Igualmente, el estudio se apoya en herramientas de computación para desarrollar un programa que categorice los diferentes tipos de superficies resultantes de la experimentación y con esto lograr criterios de selección con bases sólidas para determinar la calidad superficial que se da luego de un proceso de mecanizado.

1. TÍTULO

DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS PARA LA OPERACIÓN DE CILINDRADO DE ACERO SAE12L 14¹, BRONCE SAE40² Y ALUMINIO SAE 1060³ EN EL TORNO *PC TURN 125* POR MEDIO DE UNA METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2.1 ANTECEDENTES

[1] Desde la prehistoria la humanidad ha buscado medios y herramientas para desarrollar productos con las características deseadas que faciliten las tareas y satisfagan las necesidades. Una de las primeras formas de manufactura fue esculpir piedras y madera para crear elementos de caza para la supervivencia.

Durante la Revolución Industrial se da la aparición de máquinas y herramientas modernas con el diseño de la máquina a vapor, creada alrededor del año 1.763 en Inglaterra por James Watt, esto trajo una serie de problemas técnicos los cuales fueron resueltos con la invención de una máquina perforadora la cual dio la precisión necesaria para prevenir que hubiera una fuga de vapor en el cilindro.

Posteriormente, alrededor del año 1.800, Henry Maudsley creó un torno con una herramienta deslizante la cual desempeñaba operaciones de avance y roscado con mayor precisión.

Lo anterior indica que a través de la historia las máquinas han tenido una evolución para lograr una mejor producción en cuanto a la precisión, la calidad, la reducción de tiempos y costos.

En la parte de torneado se tienen dos tipos de máquinas: El torno mecánico y el automático. El primero se utiliza para bajas y medias producciones, mientras que el segundo, que es una innovación tecnológica del primero, es utilizado para altos volúmenes de producción donde se logran acabados con alta precisión. Este sistema automático es programado en el computador por medio de un lenguaje llamado CNC (Control Numérico Computarizado).

¹ El acero SAE 12L14 es un acero de bajo contenido de carbón y baja aleación.

² El bronce SAE 40 es un bronce de baja aleación conocido como bronce latón

³ El aluminio SAE 1060 es 100% reciclable y sin aleantes

El avance de la tecnología ha traído consigo el análisis de determinadas variables, para el proceso de producción como la profundidad de corte, el avance, la temperatura y la velocidad de corte que afectan las características de los materiales, los costos y tiempos del proceso.

Los factores, mencionados anteriormente, son las principales razones para los estudios de mecanizado en torno puesto que logrando tener la combinación de velocidad de corte y de avance y profundidad óptima, se logra mejorar los niveles de producción con productos de alta calidad y menores pérdidas de dinero y tiempo debido a reproceso en unidades defectuosas.

[2] Dentro de los estudios que se han realizado se tiene la optimización del consumo de energía para partes torneadas usando la metodología de superficies de respuesta y la técnica Taguchi donde muestra el análisis de un experimento desarrollado en el torno CNC, en el cual se tuvieron en cuenta los siguientes factores: la velocidad de corte, avance, la profundidad de corte, el ambiente de corte y el radio de la nariz, para determinar la combinación óptima dentro de tres niveles y minimizar el costo por consumo de energía.

Los niveles de los factores que se mencionaron anteriormente se encuentran en un rango de bajo, medio y alto con valores contables a excepción del ambiente de corte el cual está dado por seco, húmedo y criogénico.

Dentro de la formulación de la hipótesis se pensaba que el mejor ambiente para el desarrollo del torneado es el criogénico, dato que se confirmó, al finalizar los experimentos, por medio de los dos métodos.

[3] Otro estudio determina el coeficiente de desgaste del carburo de tungsteno en una operación de torneado. Ésta se lleva a cabo usando barras de acero de bajo y medio carbono. El diámetro inicial de las piezas era de 118 mm y las velocidades de corte eran de 70, 100, 130 y 160m/min. La fuerza fue medida por un dinamómetro. El promedio de coeficiente de desgaste del carburo de tungsteno fue de $10 \cdot 10^{-8}$ obtenido a temperaturas de 453 a 664 °C. Este valor fue obtenido experimentalmente por medio de un análisis estadístico.

[4] Por otra parte, se tiene un estudio de la “Valoración de errores inducidos de fuerza en el torno CNC” que describe un procedimiento para evaluar los errores de fuerza inducidos que ocurren en el torneado de componentes cilíndricos. Este procedimiento se basa en un modelo que representa la dureza en tiempo real de la presión del huso. Los valores de la dureza son determinados por un test, en donde la deflexión de la barra es medida.

[5] Igualmente, otra investigación que se realiza en un artículo es la verificación de la difusión de desgaste de la herramienta por medio de un modelo experimental. La difusión es considerada como el mecanismo dominante de daño para las herramientas a altas velocidades de corte y a altas temperaturas.

Finalmente, se tiene un artículo que describe una aplicación para la compensación de errores en tiempo real para el torno, en donde la temperatura es monitoreada por 16 sensores térmicos que mandan la información a un controlador y ésta es compensada en tiempo real con base en medidas tomadas empíricamente de otros modelos. El controlador recibe la señal cada 10ms y compensa el error cambiando la referencia de origen [6].

Como se puede observar, se han realizado estudios con base en las variables y factores determinantes en la producción de piezas en el torno, esto debido a la importancia que tiene este tipo de máquina dentro de la industria y las posibilidades de mejoramiento que se pueden lograr en cuanto a procesos, terminado y calidad de un producto.

2.2 FORMULACIÓN

¿Es posible reducir el tiempo del proceso de cilindrado en el torno **PC Turn 125**, determinando los valores óptimos de velocidad de corte, avance y profundidad de corte, para materiales de alta demanda en la industria metalmecánica como lo son el acero SAE12L 14, bronce SAE40 y aluminio SAE 1060?

3. JUSTIFICACIÓN

La manufactura se da con base en los productos creados por el hombre para satisfacer sus propias necesidades, todos los productos tangibles han pasado por algún proceso de manufactura. Éste término ha sido definido como “Hacer los bienes y artículos a mano o, en maquinaria, usualmente en una gran escala y con división de trabajo”[7], ésta definición se ve reflejada en el desarrollo de la manufactura a través de la historia.

La manufactura se divide en dos grandes grupos, en las operaciones de procesamiento y en las operaciones de ensamble. Dentro del primer grupo se desarrolla una transformación del material ya sea con procesos de solidificación, procesos con partículas, procesos de deformación y procesos de remoción de material. Las otras dos maneras de transformar el material son por medio de un tratamiento por calentamiento el cual cambia las propiedades del material y por medio de operaciones de procesado superficial, con químicos y procesos mecánicos.

La investigación desarrolla su análisis entorno a la remoción del material, esto se da por procesos de mecanizado como fresado, taladrado y específicamente torneado en la que la se encuentran operaciones de cilindrado, roscado, refrentado etc.

El cilindrado (que es la operación de estudio del proyecto) consiste en reducir el diámetro del material hasta las dimensiones deseadas con un proceso de desbaste y acabado en el que la herramienta y el torno deben tener una velocidad de avance y corte óptimos para que el proceso de producción sea eficiente. Ésta operación es de gran importancia en la industria puesto que el diámetro requerido es el primer paso para darle forma a una pieza. Los materiales más utilizados debido a sus propiedades y múltiples usos son: el acero, cobre y aluminio; materiales analizados en el desarrollo del proyecto.

La optimización de parámetros en el torneado de una pieza de manufactura es un tema de gran importancia en la industria ya que puede disminuir los tiempos y costos de producción al igual que mejorar la calidad del producto en cuanto al acabado superficial y posibles fracturas por una mala práctica de mecanizado.

El avance de la tecnología ha traído consigo nuevos problemas que resolver debido a la rapidez y a la exigencia del mercado. Es por esto que el proyecto se enfoca en optimizar una parte del proceso de manufactura para lograr una repercusión positiva a lo largo de la cadena de producción hasta llegar al producto final.

4. MARCO TEÓRICO

Para el desarrollo del proyecto se deben tener en cuenta los siguientes conceptos:

Los metales son los materiales más utilizados en la industria, siendo el acero el metal más consumido al punto que ha sido tomado como indicador de desarrollo industrial, éste representa una gran parte del total de la producción de metales (tabla 1). Normalmente los metales utilizados en manufactura son aleaciones, es decir, compuestos de dos o más elementos, los cuales mejoran las propiedades de los materiales.

Tabla 1: Datos de producción de materiales seleccionados de manufactura

*Mg=1000Kg

Material	Producción Mundial (10 ⁶ Mg*)	
	1972	1994
Hierro (Acero)	634	750
Aluminio	11	19.4
Cobre	7	11.5
Zinc	5.2	7.1
Grafito	3.6	5.4
Níquel	0.6	0.9
Magnesio	0.26	0.34

Fuente: John A. Schey, *Introduction to Manufacturing Processes*, 3ra Edición.

4.1 MATERIALES PARA MECANIZADO

Acero: Es una aleación de hierro y carbono, con un porcentaje de carbono entre 0.02 y 2.11% el cual varía la resistencia y maleabilidad del material según su porcentaje. También se tienen otros compuestos como manganeso, cromo, níquel y molibdeno los cuales cambian las propiedades del metal. Las aplicaciones del acero se ven en la construcción, en el transporte y productos para el consumidor, entre otros.

El acero se puede agrupar en 4 categorías según sus aleaciones: Aceros con carbono, Aceros de baja aleación, *Stainless-Steel* y Aceros de alta aleación.

En la categoría de Aceros con carbono se encuentran tres subgrupos según el porcentaje de carbono: Aceros de bajo carbono, Aceros de medio carbono y Aceros de alto carbono. Para el desarrollo del estudio se utilizarán aceros de bajo carbono, los cuales tienen un porcentaje menor a 0.20% de C y son los más utilizados.

Aluminio: Es un metal ligero y no ferroso, tiene una alta conductividad térmica y eléctrica y es resistente a la corrosión. También es un material muy dúctil, aunque esta propiedad se puede modificar cuando es aleado con calor. Éste material es muy útil para construir

aviones, vagones ferroviarios y automóviles, y para otras aplicaciones en las que es importante la conservación de la energía.

Bronce: Es un metal resistente a la corrosión y tiene una baja resistencia a la electricidad. Es el resultado de aleaer Estaño y Cobre (10 y 90% respectivamente). Estos materiales son abundantes en la naturaleza y su aleación es muy utilizada debido a su conductividad eléctrica.

4.2 MATERIAL DE LA HERRAMIENTA

Carburo Cementado: Es un material compuesto de cerámicos y metales los cuales generan alta dureza, resistencia al desgaste y a las altas temperaturas. Debido a estas propiedades, la aplicación más común de éste material es la creación de herramientas de corte (insertos). El carburo más utilizado es el Carburo de Tungsteno (WC), el cual es producido al carburizar polvo de tungsteno.

Las herramientas de carburo cementado se dividen en dos categorías según los materiales a mecanizar: la primera es para materiales no ferrosos, como aluminio, cobre, titanio etc., la cual tiene una aleación de carburo de tungsteno y cobalto (WC-Co) que favorece el corte de éstos materiales, la segunda es para materiales ferrosos con un compuesto de carburo de titanio, carburo de tantalio, carburo de tungsteno y cobalto (WC-TiC-TaC-Co) que mejoran la resistencia al desgaste para éstos materiales pero tiene un efecto contrario en los no ferrosos.

Sin embargo, en la actualidad las empresas fabricantes de herramientas de corte han buscado determinar los porcentajes de elementos óptimos para que los insertos sean utilizados para todo tipo de materiales teniendo mayores beneficios en unos que en otros.

4.3 CARACTERÍSTICAS DEL PROCESO

Mecanizado: Es un proceso de manufactura que por medio de diferentes herramientas de corte remueve el material y le da la forma deseada a la pieza en la que se está trabajando; estos procesos pueden ser de torneado, fresado, taladrado, entre otros., según el tipo de forma y de operación que se le necesite realizar a la pieza.

Torneado: Es una operación que es llevada a cabo en el torno, donde una herramienta de corte remueve el material de una pieza que está sujeta al husillo dándole una forma cilíndrica. La velocidad de corte es generada por la rotación del husillo y la herramienta tiene un avance paralelo al eje de rotación de la pieza el cual complementa la operación de torneado.

Cilindrado: Es una operación que se realiza integrando el movimiento de rotación del torno y el de avance de la herramienta, de tal forma que remueve el material de manera rectilínea y paralela al eje de rotación de la pieza generando un cilindro.

Herramienta de corte: La figura 1. muestra las partes de un inserto o buril utilizado para torneear piezas. Consta de una nariz, que tiene diferentes propiedades según el ángulo (Las propiedades se analizan en detalle posteriormente en éste capítulo), una cara que ayuda a dirigir la viruta la cual es cortada con el borde y el cuerpo que sujeta el inserto.

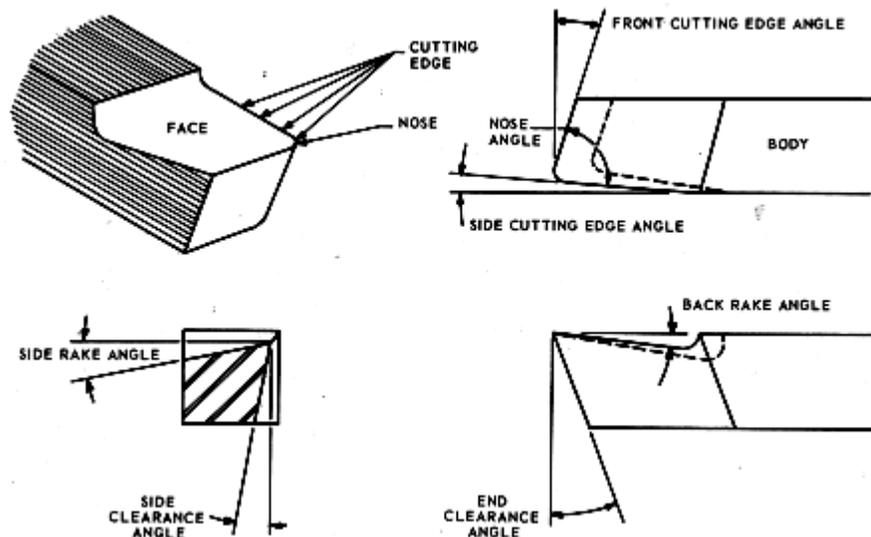


Figura 1: Partes de herramienta de corte.

Fuente: web.mit.edu/2.670/www/Tutorials/Machining/lathe/Description.html.

Recuperado Marzo de 2009.

Temperatura: La energía que se utiliza en el mecanizado de piezas se transforma en calor. La mayor parte de ésta energía (80%) se transfiere a la viruta, la cual cae a medida que se realiza el corte del material, la otra parte es transferida a la herramienta, que requiere de un proceso de enfriamiento para que no llegue al punto de fundición y se produzca una deformación, y una pequeña parte de energía se transfiere al material de corte [8].

Líquido de enfriamiento: El torno CNC cuenta con un líquido de enfriamiento que básicamente cumple tres funciones: (1) Lubricar; menor fricción, reduce el consumo de energía y mejora el acabado superficial de la pieza. (2) Enfriar; reduce la temperatura de la viruta, de la pieza y de la herramienta. (3) Remoción de viruta.

Viruta: La viruta se genera en el corte de una pieza por una deformación y cizallamiento del material. Hay cuatro tipos de viruta; que afectan el acabado superficial y la operación de corte, estos son:

- Virutas continuas: Usualmente se forman con materiales dúctiles y producen un buen acabado superficial, aunque el largo de éstas puede afectar el proceso de corte debido a que se puede enredar con la herramienta o pieza. Esto sucede sobretodo, en máquinas de control numérico que no requieren de supervisión continua y trabajan a altas velocidades.
- Virutas de borde acumulado: Son capas acumuladas de material que se adhieren a la herramienta y también pueden adherirse a la pieza. Esto afecta el acabado superficial de la pieza.
- Virutas segmentadas o escalonadas: Son virutas semicontinuas, usualmente se ven en materiales de baja conductividad térmica como el titanio.
- Virutas discontinuas: Se da en materiales con impurezas o con inclusiones, materiales frágiles, velocidades de corte muy bajas o muy altas, grandes profundidades de corte y otros factores que generan fuerzas de corte discontinuas que pueden afectar el acabado superficial del material.

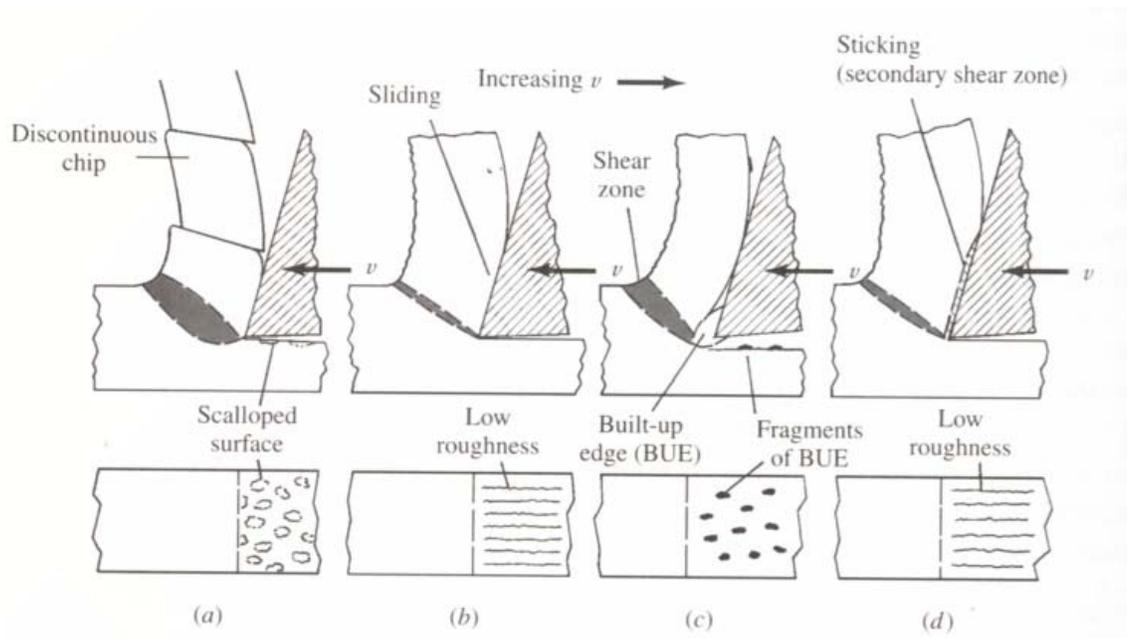


Figura 2: Proceso de formación de la viruta. (a) Viruta Discontinua (b) Viruta Continua (c) Viruta Borde acumulado (d) Viruta Segmentada.

Fuente: [8].

Corte de desbaste y acabado: Cuando se realiza la operación de cilindrado se debe hacer un desbaste de la pieza el cual se utiliza para acercarse a las dimensiones deseadas, éste corte se realiza con grandes avances y grandes profundidades de corte debido a que se necesita remover bastante material y se puede dejar cierta aspereza en la pieza, ésta aspereza se corrige con el acabado; operación que se realiza con cortos avances y profundidades de corte para lograr, como su nombre lo indica, un buen acabado superficial.

Las tolerancias comerciales para acabado y desbastado que son aceptadas en la industria son:

Acabado: 0.05 a 0.13 (\pm mm)

Desbaste: 0.13 (\pm mm)⁴

Radio de nariz: Es la punta de la herramienta de corte, su ángulo afecta el acabado superficial y la resistencia de la herramienta (A menor ángulo menor resistencia del inserto y peor acabado superficial, a mayor ángulo mejor acabado superficial pero puede provocar traqueteo (vibración en la máquina que afecta la superficie de la pieza)).

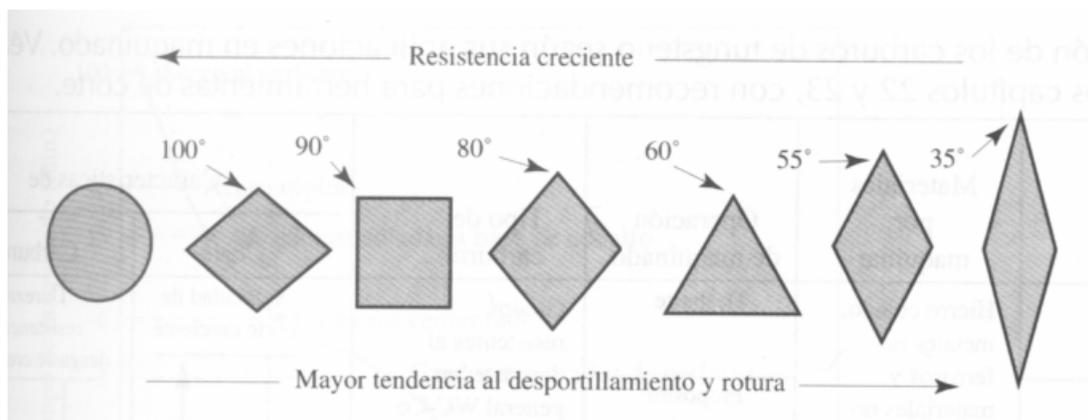


Figura 3: Resistencia relativa de arista y tendencia al desportillamiento y rotura de insertos de diversas formas. La resistencia se refiere al filo que indica los ángulos incluidos.

Fuente: [8].

Calidad superficial: Todas las superficies tienen una textura superficial la cual es definida y medible según sus características. Estas son: Imperfecciones o defectos (rayaduras, grietas, agujeros etc.), Direccionalidad o sesgo (dirección de un patrón superficial predominante), Rugosidad (Irregularidad de la superficie), Perfil ondulado (Desviación recurrente de una superficie plana).

⁴ S. Kalpakjian, Manufactura, ingeniería y tecnología, Pearson Educación, 4ta Edición.

La rugosidad superficial es medible por medio de un Rugosímetro Superficial el cual ayuda a determinar los defectos de un proceso de corte para que éstos sean analizados y corregidos.

4.4 PARÁMETROS DE CORTE

Profundidad de corte: Está predeterminada por la geometría de la pieza de corte y por la secuencia de las operaciones. Usualmente para operaciones de desbaste se utiliza la mayor profundidad posible mientras que para el acabado se utiliza la profundidad necesaria para lograr las dimensiones requeridas.

Avance: Es la distancia que recorre la herramienta en cada revolución de la pieza. Las unidades son: (mm/rev o pulg/rev)

Velocidad de corte: La velocidad se da por el giro del husillo (m/min o ft/min) y es muy importante en el proceso de torneado debido a que influye en los tiempos de producción y en el desgaste de la herramienta. Se debe tener un valor óptimo para encontrar un balance entre la tasa máxima de producción y la vida útil de la herramienta.

La velocidad de corte está dada por la siguiente ecuación:

$$Vc = (\pi * Di * Vh)/1000 \text{ Fórmula 1.}$$

Donde:

$Vc = \text{Velocidad de Corte}$

$Di = \text{Diámetro inicial}$

$Vh = \text{Velocidad del husillo}$

4.5 ESTUDIO DE IMÁGENES

“El concepto de superficie visual es muy amplio y su definición varía dependiendo del entorno en el que ésta se trabaje y el enfoque de la aplicación en la que se desarrolle. En general, la textura visual se identifica con la forma en la que los objetos reflejan la luz; la estructura tridimensional de las superficies, los distintos grados de rugosidad y regularidad a nivel macro y microscópico definen esta característica. [18]

La superficie de la imagen definida como función de la variación espacial de las intensidades de los píxeles (blanco y negro), es útil en una gran variedad de aplicaciones y ha sido objeto de estudios intensos por muchos investigadores.

El concepto de superficie visual se aplica a todo tipo de imágenes que contienen variaciones de intensidad que forman patrones repetitivos, los cuales tomados de forma independiente son sometidos por el sistema visual a un análisis de formas; es muy importante distinguir las características de superficie y forma en la representación de un objeto. La textura como elemento visual para identificar regiones homogéneas puede dar lugar a varias ramas básicas de estudio, ejemplos de éstas son: [19]

- La clasificación de superficies, que busca producir un mapa de una imagen de entrada donde cada región uniforme es identificada con la clase de textura a la cual pertenece.
- La segmentación de superficies es un procedimiento que se guía hacia la búsqueda de fronteras entre regiones homogéneas de la imagen, tiene como objeto entonces generar un mapa de fronteras de la imagen.
- La síntesis de superficies es comúnmente usada en aplicaciones de compresión, debido a que ésta busca la generación de imágenes de texturas de superficies a través de la computadora, buscando hacer la imagen lo más cercana posible a la de un objeto real.” [17]

4.5.1 ANALISIS DE IMÁGENES

“Las superficies contenidas en una imagen caracterizan la organización espacial de ésta y entregan información cualitativa acerca de la finura, grosor, granulación, entre otras, del objeto.

Generalmente, en visión por computador, la característica de superficie de imágenes es estudiada bajo dos puntos de vista: el enfoque estadístico y el estructural.

El análisis estadístico modela las superficies como campos aleatorios, habitualmente homogéneos, donde las características locales se calculan de manera paralela para cada punto de la imagen, las mediciones se derivan de un conjunto de valores definidos por la concatenación de la intensidad de posiciones específicas relativas a cada punto de la imagen. El análisis estadístico no considera la existencia de patrones estructurales definidos y toma el píxel como único elemento base de la superficie en una representación discreta. De acuerdo con el número de puntos, según los cuales se han definido las características locales, los valores estadísticos son clasificados en primero, segundo, o de alto orden estadístico.

El análisis estructural considera que la superficie se compone de la repetición de patrones elementales espacialmente localizados. Es posible disponer de reglas sobre los atributos del elemento para definir la superficie.”[17]

5. OBJETIVO GENERAL

Determinar los valores óptimos para la operación de cilindrado en el torno *PC Turn 125* con base en una metodología experimental buscando mejorar el proceso de de cilindrado en desbaste y/o acabado en acero SAE12L 14, bronce SAE40 y aluminio SAE 1060.

6. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar los parámetros iniciales (estandarizados) de las variables a estudiar para llevar a cabo el desarrollo del experimento.
- Determinar los parámetros funcionales del torno PC Turn 125.
- Caracterizar el material y las condiciones de trabajo.
- Establecer los parámetros de trabajo para desarrollar el experimento.
- Analizar y confrontar los resultados obtenidos experimentalmente con los teóricos.

7. TÉCNICAS DEL DISEÑO DEL EXPERIMENTO

7.1 DISEÑO DEL EXPERIMENTO (DDE)

Para desarrollar el experimento se analizaron diferentes métodos los cuales proponían una ejecución sistematizada del proceso para obtener los mejores resultados. Uno de estos es la Metodología de Superficie de Respuesta (RSM por sus siglas en inglés) la cual se basa en técnicas estadísticas y matemáticas para optimizar la solución a problemas que se ven afectados por múltiples variables. Las Superficies de Respuesta también analizan la relación que tienen los parámetros para determinar cuáles de estos influyen más en los resultados; éste método se apoya en gráficos en 3D para analizar las diferencias entre los datos obtenidos experimentalmente y los datos predichos [2]. Las técnicas de Regresión Estadística también son utilizadas para analizar las relaciones que tienen las variables de entrada y salida en procesos de mecanizado aunque esta técnica no describe con precisión la relación no lineal entre las variables de decisión y las de respuesta [9]. El método que se acerca en mayor medida a las necesidades del experimento es el diseño de Taguchi el cual utiliza métodos estadísticos y técnicos para optimizar el proceso de manufactura de un producto y con esto alcanzar altos índices de calidad en los resultados, con bajos costos.

El método Taguchi propone un diseño de proceso menos sensible de tal forma que las variables no controlables afecten en menor medida el desempeño del experimento. El diseño utiliza arreglos ortogonales estandarizados, los cuales determinan un número inferior de pruebas a realizar con base en el número de factores y de niveles que se establezcan para el experimento; Los factores son las variables, parámetros o entradas necesarios para la ejecución del experimento y los niveles son los valores que se le dan a los factores para obtener y analizar los diferentes escenarios posibles [10].

Por medio de técnicas estadísticas como la desviación de la media cuadrada, la identificación de los grados de libertad y un análisis de la varianza, éste método analiza las interrelaciones entre los factores con el fin de determinar el grado de afectación de éstos en el desarrollo del experimento [10].

El método Taguchi utiliza principalmente los conceptos mencionados anteriormente para encontrar las mejores soluciones a los problemas propuestos y es por esto que éste método fue la principal opción para diseñar el experimento.

Luego de realizar los análisis previos y de determinar la metodología que se llevaría a cabo para el desarrollo del experimento se consultó con un experto en la materia (Experto1) para asegurar la correcta aplicación del método Taguchi. El ingeniero encontró un problema en el planteamiento del experimento debido a que la variable respuesta (que será explicada posteriormente) es discreta y los métodos existentes utilizan variables de respuesta continuas para la aplicación de las técnicas estadísticas y para los análisis de las interacciones entre los factores.

Debido al inconveniente presentado anteriormente se llegó a la conclusión, con ayuda del Experto1, de realizar el experimento con el número total de pruebas necesarias para los factores con sus respectivos niveles.

La variación en la metodología también indica que se debe realizar un análisis detallado de los factores que se van a tener en cuenta para el DDE debido a que no se realizará un estudio estadístico del grado de afectación por parte de los factores que se incluirán en el experimento.

7.2 REDES NEURONALES

[11] [12] [13] [14] Una red neuronal es un sistema que simula la arquitectura del cerebro humano. Se basa en la utilización de algoritmos de aprendizaje para encontrar patrones o relaciones que le permitan modelar una estructura para resolver problemas de clasificación, diagnóstico, identificación, optimización o predicción.

Las redes neuronales se componen de un número determinado de neuronas. Las neuronas artificiales son componentes de software capaces de simular las cuatro principales tareas que una neurona biológica desarrolla: aceptar las entradas, procesar las entradas, transformar las entradas procesadas en salidas y por último, hacer contacto entre las neuronas para transportar la información.

Cada entrada tiene un “peso” asociado, el cual es multiplicado por la misma y luego es sumado con los pesos de las otras entradas. Este resultado es aplicado a una función de transferencia que genera la salida de la neurona. Dependiendo del tipo de aplicación que es desarrollada, se cuenta con diferentes funciones de transferencia para lograr los resultados específicos.

Algunas de las funciones de transferencia son: Limitador fuerte, crea neuronas que clasifican las entradas en dos categorías diferentes, Lineal, hace las salidas iguales a las entradas, y Sigmoidal, toma los valores de entrada que pueden estar entre más y menos infinito y restringe la salida a valores entre cero y uno.

Mientras que una neurona tiene un uso muy limitado, las conexiones entre varias pueden mejorar el desempeño en la solución a problemas propuestos. Las redes neuronales se encuentran agrupadas por capas según la ubicación en la red. La primera, que no es contemplada por la mayoría de autores puesto que en ésta no se realiza ningún tipo de proceso es la Capa de Entrada; la segunda capa donde se encuentran las neuronas que realizan el proceso se llama Capa Oculta (una red puede tener una o varias capas ocultas), y la última capa donde se transmiten los datos al medio externo se llama Capa de Salida. (Figura 4)

El entrenamiento de las redes neuronales se puede dar supervisado o no supervisado. El primer entrenamiento se da cuando se tienen los datos de entrada y de salida para la red. En éste caso la red es corrida varias veces y se adapta a sí misma cambiando los pesos de las entradas en cada corrida en un monto proporcional a la diferencia entre las salidas deseadas y las salidas de la corrida actual.

El segundo entrenamiento se da cuando se presenta un conjunto de patrones (únicamente de entrada) a la red y ésta ajusta los pesos hasta que encuentra una estructura en los datos.

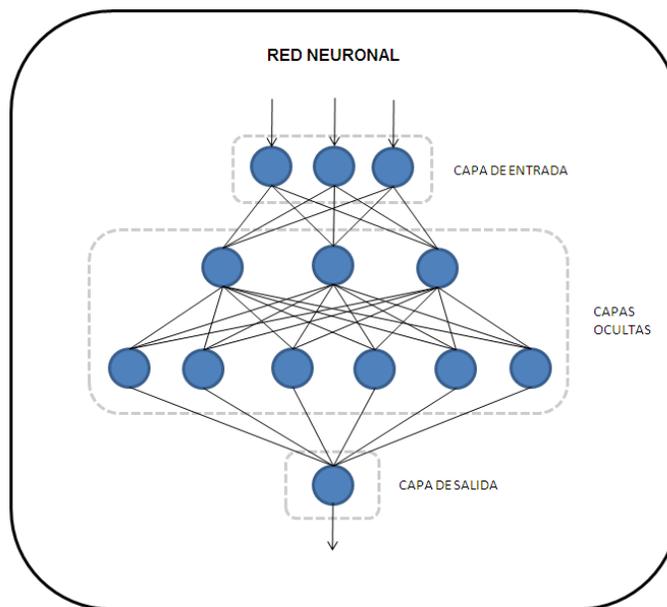


Figura 4: Estructura de una red neuronal

Hay diferentes tipos de redes neuronales según el algoritmo de aprendizaje que utiliza. Algunos de los tipos son: *Perceptrón*, *Adaline* y *Backpropagation*, la última es la más utilizada debido a su estructura multicapa.

Las redes permiten un flujo de la información hacia adelante, hacia atrás, entre las neuronas de la misma capa y finalmente, algunas permiten que la información sea enviada de regreso a la misma neurona durante el entrenamiento.

8. DETALLES DEL EXPERIMENTO

8.1 MATERIALES Y HERRAMIENTAS UTILIZADAS

8.1.1 MATERIALES DE TRABAJO

Para el desarrollo del experimento se utilizarán los siguientes materiales con sus respectivas características y propiedades tanto físicas como químicas. Éstos materiales fueron seleccionados debido al gran uso que tienen en la industria.

ACERO SAE12L14: Es un acero de bajo carbono y debido a la presencia de plomo es de fácil mecanizado. Se utiliza para piezas de fabricación en serie.

Tabla 2: Propiedades del Acero SAE 12L14.

ACERO SAE 12L14											
Imagen	COMPOSICIÓN QUIMICA					PROPIEDADES MECÁNICAS					
	C	Mn	P	S	Si	Estado del material	Resistencia a la tracción Kg/mm ²	Limite elástico Kg/mm ²	Alargamiento %	Reducción de área %	Dureza Brinell
	0,15 máx.	0,85/1,15	0,04/0,09máx.	0,026/0,35máx.	0,15/35Pbmáx.	Calibrado	55	42	10	35	163

Fuente: Acefer y Cia. LTDA.

BRONCE SAE 40: Es un metal para usos con una moderada resistencia mecánica, es de fácil corte y tiene buena maquinabilidad⁵.

Tabla 3: Propiedades del Bronce SAE 40.

BRONCE SAE 40														
Imagen	COMPOSICIÓN QUIMICA										PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS			
	Cu%	Sb%	Sn%	Fe%	Pb	Ni	Zn%	S	P	Al	Resistencia a la tracción	Resistencia a la deformación	Resistencia a la fatiga	Dureza Brinell
	84/86	0,25 máx.	4,0/6,0	0,3 máx.	4,0/6,0	1,0 máx.	4,0/6,0	0,08 máx.	0,05 máx.	0,005máx.	37.000PSI	17.000PSI	11.000PSI	60

Fuente: Acefer y Cia LTDA.

ALUMINIO SAE 1060: Es un metal dúctil, de mediana mecanización y debido a que es ligero y a que tiene una alta resistencia a la corrosión, es altamente utilizado en la industria.

⁵ Maquinabilidad: Es la relativa facilidad con la que se puede remover el material de un metal por medio de procesos de mecanizado como el corte y el amolado. Fuente: <http://www.toolingu.com/definicion-201200-5878-maquinabilidad.html>, Recopilado: Octubre de 2009

Tabla 4: Propiedades del Aluminio SAE 1060.

ALUMINIO SAE 1060							
PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS							
Imagen	Módulo de Tracción	Densidad a 20°C	Punto de Fusión (°C)	Resistencia a la tracción Kσ/mm ²	Límite elástico (MPa)	Alargamiento	Dureza Brinell
	70,6GPa	2,7	660,4	50-90	110-170	5-35%	48

Fuente: http://www.quiminet.com/ar7/ar_AAassadvchgsA-el-aluminio-un-metal-con-aplicaciones-singulares.htm Recuperado: Septiembre de 2009.

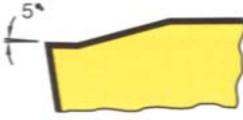
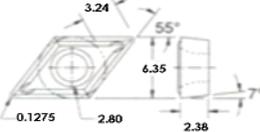
8.1.2 HERRAMIENTAS DE TRABAJO

HERRAMIENTA DE CORTE: La herramienta utilizada para el desarrollo del experimento es un inserto de marca *Kennametal*, referencia DCMT 21.51LF de grados KC730. Los grados simbolizan el compuesto, el cual en este caso es de PVD (deposición física de vapor) y TiN (nitrato de titanio); propiedades que logran un alto grado de resistencia al desgaste, una superficie suave que genera menor calor debido a la fricción, bajas fuerzas de corte y una disminución en la viruta de borde acumulado BUE (Built-Up Edge) que perjudica el proceso de mecanizado.

Éste inserto se utiliza para propósitos generales de mecanizado a altas velocidades y debido a sus propiedades químicas permite el mecanizado de materiales de difícil maquinado, como por ejemplo el aluminio.

La Tabla 5 muestra las propiedades físicas del inserto:

Tabla 5: Propiedades físicas del inserto.

INSERTO DCMT21.51LF KC730				
ESTILO	GEOMETRÍA	PERFIL	INSERTO	MEDIDAS
MT-LF				

Fuente: Kennametal Catálogo 6000

HERRAMIENTA DE MEDICIÓN: La medición de las piezas se realiza con un calibrador digital marca *Mitutoyo* de referencia CD-6'' CSX-B. Las mediciones se realizan en

pulgadas debido a que el calibrador cuenta con 4 cifras significativas para ésta unidad de medida, mientras que sólo tiene 2 cifras significativas para la medición en milímetros.

El calibrador tiene un margen de error de 0.5 milésimas de pulgada. La evaluación del patronaje se encuentra en el Anexo A.

HERRAMIENTA DE MEDICIÓN DE TEMPERATURA: Se cuenta con un instrumento de mano para la medición de la temperatura marca *Phywe*, referencia 0714000. Éste instrumento se utiliza para controlar que las piezas se encuentren a temperatura ambiente antes de ser mecanizadas y para medir la temperatura final de la pieza luego de pasar por éste proceso. La temperatura se mide en grados Celsius.

8.1.3 MÁQUINA

La máquina utilizada para el mecanizado de los materiales es un torno *EMCO PC TURN 125* de bancada inclinada tipo revolver, semi-industrial de alta precisión, programado por medio de un lenguaje de programación CNC (Control Numérico Computarizado).

Las especificaciones del torno se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 6: Especificaciones Torno EMCO PC TURN 125

EMCO PC TURN 125		
IMAGEN	DATOS MECÁNICOS Y DE OPERACIÓN	
	Revoluciones del husillo	500 - 5000rpm
	Potencia Motor Principal	746W
	Diámetro máx. de pieza en plato	120mm
	Diámetro de volteo	180mm
	Fuerza máx. de avance	2000N
	Presión de trabajo	mín 4bar-máx 6bar

Fuente: Ficha técnica CTAI

8.2 CONDICIONES DEL EXPERIMENTO

El experimento se desarrolló en el Centro Tecnológico de Automatización Industrial (C.T.A.I) ubicado en la Pontificia Universidad Javeriana. Se utilizaron 3 barras de 1 metro de largo para cada uno de los materiales a mecanizar (acero, aluminio, bronce), cada barra fue cortada a una longitud de 70mm. El diámetro inicial del aluminio fue de 33mm, medida que fue disminuida a 30mm en un proceso de cilindrado previo en el torno *Winston*⁶ de tal forma que las mordazas del torno *Emco* pudieran sostener el material. El diámetro inicial del bronce fue de 30mm, medida adecuada para mecanizar el material en el torno *Emco*, por otra parte el diámetro inicial del acero fue de una pulgada (25.4mm).

⁶ Torno Winston: Torno convencional de 1m de bancada, con copa de 3 mordazas y luneta, para el mecanizado de cualquier tipo de material.

El torno utiliza dos tipos de mordazas, la primera para diámetros de 30mm y la segunda para diámetros de 26mm, por lo tanto fue necesario realizar primero las pruebas de aluminio y bronce y luego las de acero para evitar el intercambio constante de las mordazas durante el experimento.

Previo al desarrollo de las pruebas, se realizó una programación en el lenguaje CNC del torno en el que se determinaron las variables necesarias que iban a ser modificadas durante el experimento, con el fin de analizar los resultados obtenidos y encontrar soluciones que cumplan con los objetivos establecidos de la práctica.

El programa se realizó teniendo en cuenta 3 variables modificables, la primera es la profundidad de corte; ésta variable es fundamental para obtener las medidas requeridas en un proceso de desbaste y acabado, la segunda es el avance; ésta variable afecta el tiempo corte y la calidad superficial del material mecanizado, y la tercera son las revoluciones del husillo que al igual que el avance afecta el tiempo de mecanizado e influye en el desgaste de la herramienta. Los anteriores parámetros varían dentro de determinados rangos según el proceso de cilindrado que se lleva a cabo, es decir, si es de desbaste o de acabado.

Los parámetros o variables que se tomaron como factores para el experimento fueron los mencionados anteriormente debido a que se puede tener control sobre ellos, ya sea ingresándolos en el torno o verificando sus resultados luego de realizadas las pruebas. Otros factores que podrían haber estado involucrados en el experimento pero que fueron descartados por distintas razones, son: el refrigerante, que no se tuvo en cuenta porque las pruebas realizadas se desarrollaron en una única pasada por el material, es decir, para los procesos de desbaste y acabado el inserto recorría una longitud de 35mm por el acero, bronce o aluminio buscando obtener las medidas requeridas sin que estos materiales sufrieran algún tipo de deformación. El otro factor que no se tuvo en cuenta fue el desgaste de la herramienta, debido a que se tiene como premisa que los insertos de PVD y TiN tienen un alto grado de resistencia al desgaste y una larga duración en los procesos de corte; además, no se tiene una metodología clara para analizar el proceso de desgaste que sufre la herramienta entre cada prueba realizada.

Se tuvo en cuenta 3 niveles diferentes para cada factor con el fin de hacer una combinatoria entre todos los parámetros y con esto tener la mayor cantidad posible de datos y posibles respuestas para categorizar las diferentes calidades superficiales entre Baja, Media y Alta, según las condiciones propuestas de cada categoría.

8.2.1 CATEGORIZACIÓN DE CALIDAD SUPERFICIAL

La calidad superficial es de gran importancia en los procesos de corte de material debido a que las piezas necesitan cumplir determinadas características según el propósito para el cual fueron diseñadas, es decir, luego del mecanizado de un material se deben tener buenos resultados en la homogeneidad y en el brillo de la superficie, al igual que en las dimensiones de la pieza.

Se tuvieron en cuenta diferentes características para determinar la calidad de las superficies según el proceso de cilindrado. En desbaste se optó principalmente por obtener una uniformidad en la superficie, es decir, una conservación de la forma a lo largo del cilindro y debido a que éste debe ser un proceso de corte rápido para minimizar el tiempo en los ciclos de mecanizado, se buscaron que los parámetros tuvieran los más altos rangos logrando las mejores características superficiales.

El proceso de acabado difiere al proceso de desbaste en cuanto a que no se busca obtener los más altos rangos en los parámetros para minimizar el tiempo de mecanizado sino de lograr los mejores valores que dejen una superficie brillante, homogénea y con el mínimo margen de error posible en las dimensiones de la pieza.

En el acabado también se tiene en cuenta que la herramienta haga una única pasada por la pieza para que no se aumente el tiempo de mecanizado con ciclos innecesarios.

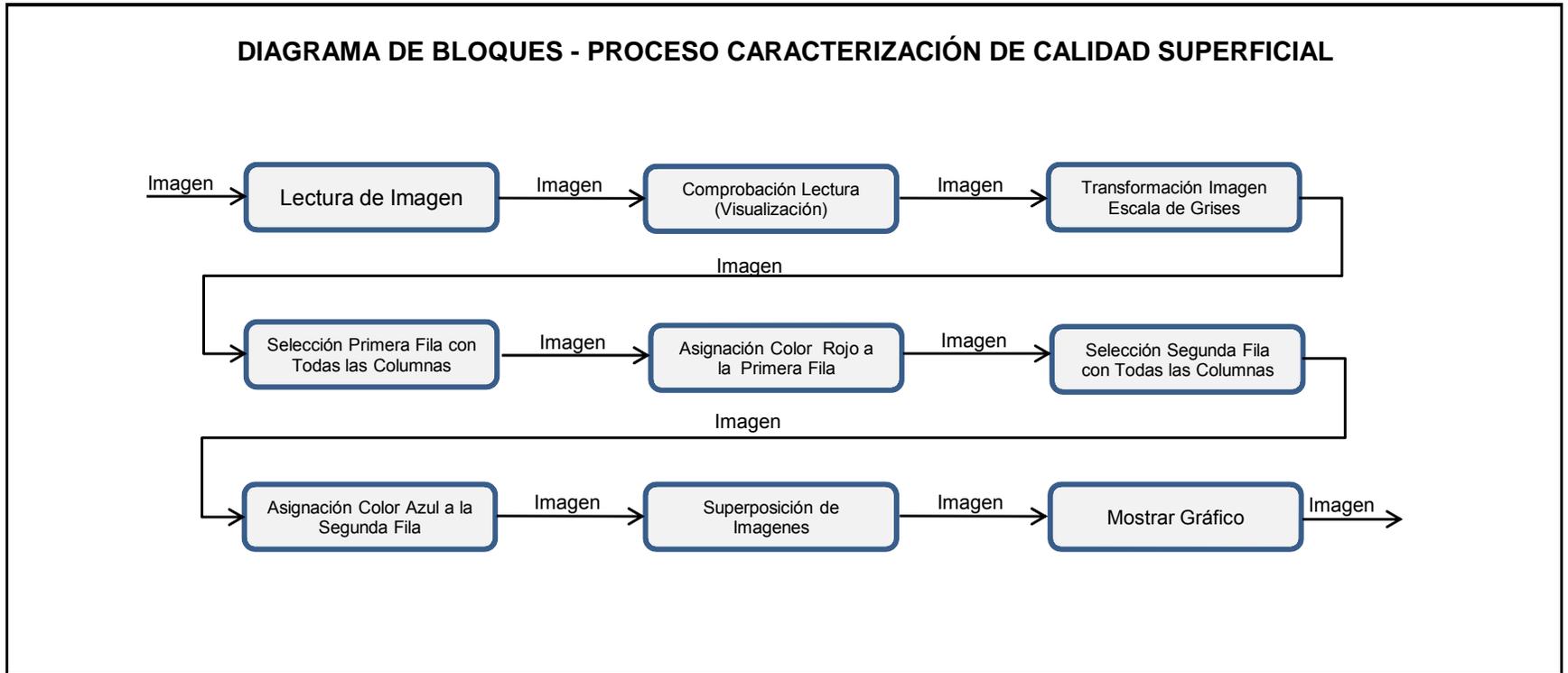
Tanto para el desbaste como para el acabado se categorizaron las superficies dentro de tres niveles. El primer nivel es denominado de calidad "Alta" y dentro de esta categoría se encuentran los mejores resultados obtenidos, que cumplen con las características señaladas anteriormente, según el proceso (Desbaste o Acabado). El segundo nivel es denominado de calidad "Media" y en éste se encuentran las piezas que no cumplieron completamente las características requeridas por la calidad superficial pero que son aceptables para algunas finalidades. En el último nivel se encuentran las piezas que no lograron las características deseadas por los procesos y éste se denominó de calidad "Baja".

La medición de las características superficiales que se llevó a cabo para la categorización de las piezas en primera instancia fue realizada visualmente, y fue evaluada por el Experto2. Posteriormente, con ayuda del Experto2 se realizó un programa en Matlab⁷, capaz de identificar, procesar y categorizar las superficies cuando no se tenga presente la ayuda de un experto. El diagrama de la Figura 5 muestra los pasos que se deben realizar para obtener la categorización de las superficies.

⁷ MatLab[®] es un lenguaje de alto nivel que permite desarrollar tareas computacionales.

Fuente: <http://www.mathworks.com/products/matlab/?BB=1> Recuperado: Octubre de 2009

Figura 5: Diagrama de Bloque para el proceso de caracterización de calidad superficial.



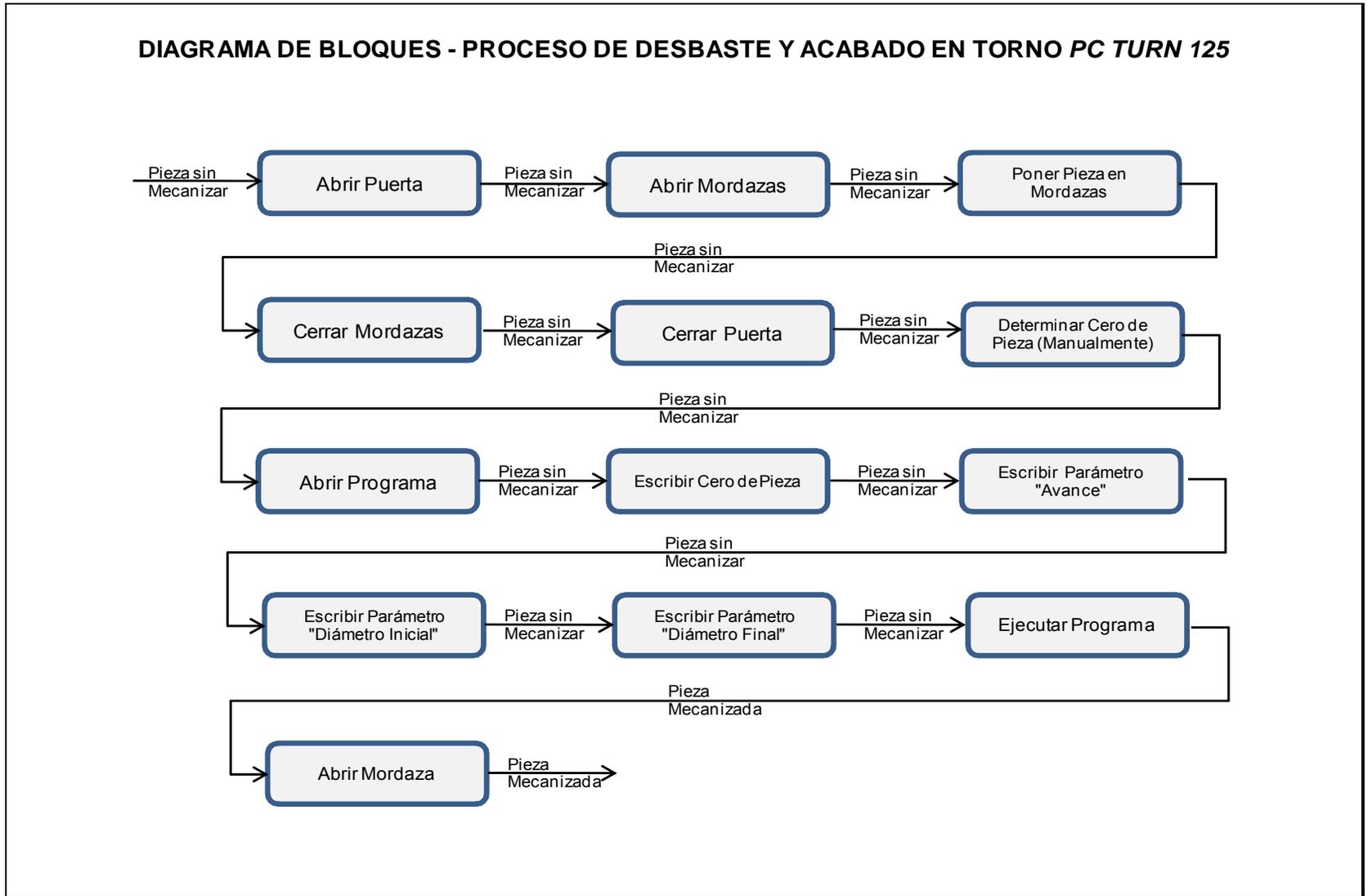
8.2.2 PROGRAMACIÓN DE TORNO *EMCO PC TURN 125*

El torno se basa en un lenguaje de programación CNC (Control Numérico Computarizado) para realizar los diferentes tipos de mecanizado. En el Anexo B se encuentra la descripción del lenguaje de programación, el protocolo de operación, las precauciones de manejo y los cuidados que se deben tener con el equipo.

En el Anexo C se encuentra el Diagrama de Bloques con los pasos para editar un programa en el torno Emco PC Turn 125, desarrollado por el Experto3.

Por otra parte, la Figura 6 muestra el Diagrama de Bloques con los pasos que se llevaron a cabo para realizar las pruebas del experimento desde que se introduce la pieza sin mecanizar en el torno hasta que termina la prueba y sale mecanizada.

Figura 6: Diagrama de Bloque para el proceso de desbaste y acabado



8.2.3 PROGRAMACION RED NEURONAL

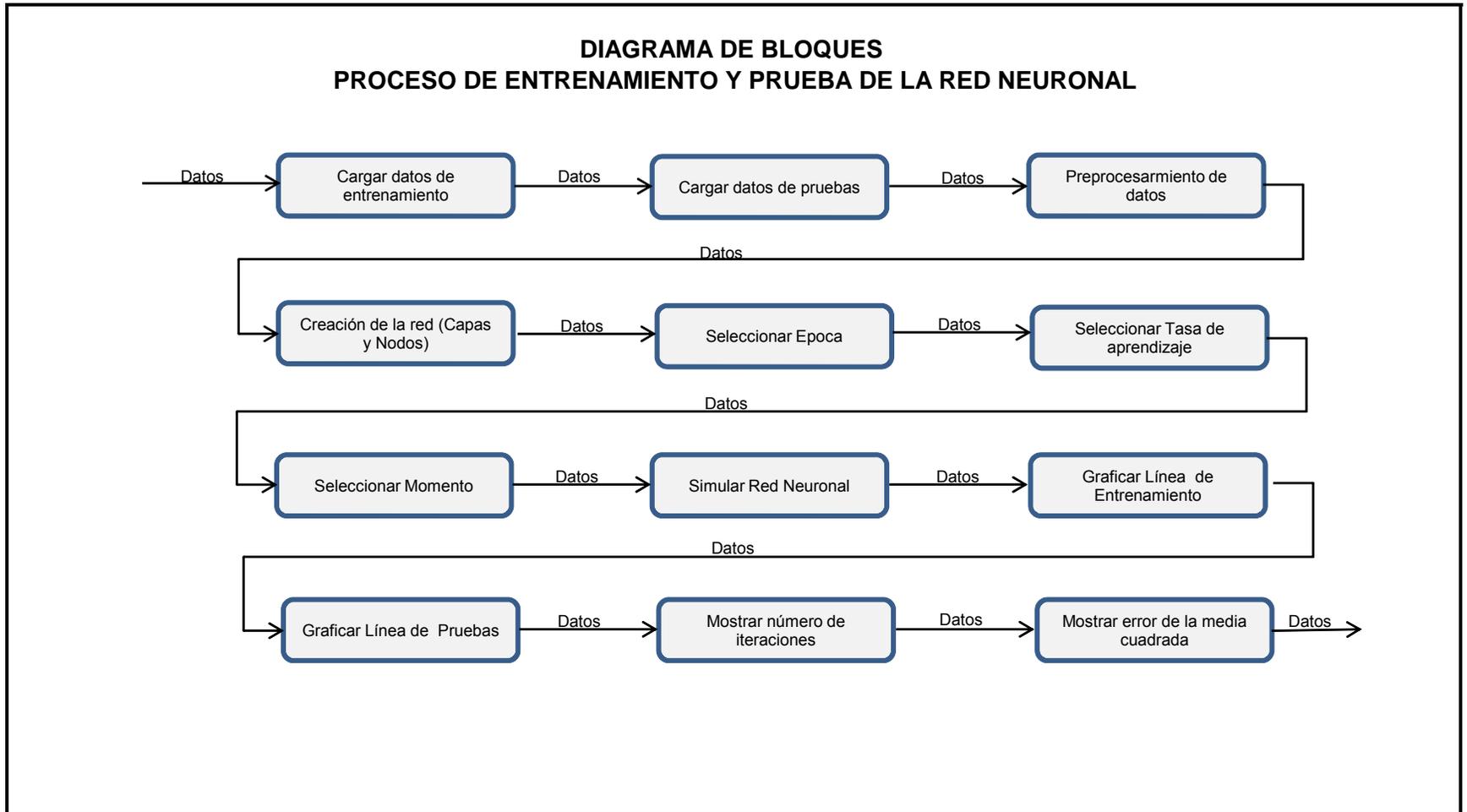
La red que se desarrolló con ayuda del Experto4 en Matlab® para predecir los resultados de las calidades superficiales de los diferentes materiales es de tipo Feedforward Backpropagation con aprendizaje supervisado. La función de transferencia que se utilizó fue la Sigmoidal, por lo tanto los resultados se encuentran en un rango de 0 a 1. [12]

El algoritmo de Feedforward Backpropagation emplea un ciclo de propagación en dos fases. La primera se realiza una vez que se da el patrón de entrada a la red, éste se propaga desde la primera capa hasta generar una salida (flujo hacia adelante). La segunda es la comparación de la señal de salida con la salida esperada. Esta diferencia que se obtiene es el error que se propaga hacia atrás para nivelar los pesos de las entradas (flujo hacia atrás). [13]

La tasa de aprendizaje que se usó fue 0.3 debido a que logra predicciones de errores aceptables. El momento (suma de una fracción del ajuste del peso anterior al peso actual) fue de 0.05 y las épocas fueron de 3000. Estos datos fueron obtenidos de estudios previos de redes neuronales para procesos de optimización. [15] [16]

Las redes fueron entrenadas con los siguientes parámetros: Profundidad del corte, Avance, Velocidad del Husillo y Material. Los datos que se utilizaron para el entrenamiento y prueba de la red son los derivados de las pruebas de 3 factores con 3 niveles.

Figura 7: Diagrama de Bloque para el proceso de entrenamiento y prueba de red neuronal



9. DESARROLLO DEL EXPERIMENTO

9.1 PRUEBA DE VIRUTA

En la primera parte del experimento se analizó el desprendimiento de viruta de cada material cuando éste pasa por un proceso de cilindrado. Por lo tanto se realizaron 7 pruebas para los materiales en donde se empezó con un avance de 0.005mm/rev y se aumentó ésta variable en intervalos de 5 milésimas de milímetro hasta llegar a 0.035mm/rev. La profundidad de corte se mantuvo constante en 0.5mm, al igual que la velocidad del husillo que fue de 1.500rpm. Las 7 pruebas se realizaron en el mismo material y se comenzaron con una longitud de 40mm y se disminuyó en intervalos de 5mm hasta llegar a 10mm; estos valores iniciales se basaron en la experiencia y conocimiento de un experto en la materia. Los resultados de cada material se encuentran en la siguiente tabla:

Tabla 7: Características de la viruta. Aluminio.

ALUMINIO SAE 1060	
Imagen	Características
	Las primeras pruebas que se realizaron fueron las de aluminio. Éste material muestra una viruta <i>continua</i> en todos sus procesos de cilindrado en los que la pieza es mecanizada sin ninguna eventualidad. El largo de la viruta aumenta a medida que aumenta el avance. En algunos casos la viruta se enreda en la pieza que se encuentra en proceso de mecanizado y la raya, esto afecta la calidad superficial.
	Usualmente el proceso de desbaste en aluminio presenta rebaba. A pesar de que éste residuo de material no afecta el proceso de cilindrado, sí es molesto al momento de quitarlo, debido a que normalmente queda adherido al final de la pieza y la persona que mecaniza el material debe tomarse el tiempo necesario para retirarlo.

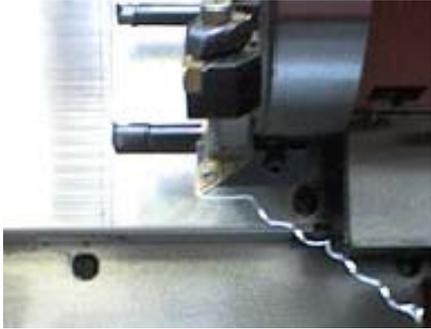
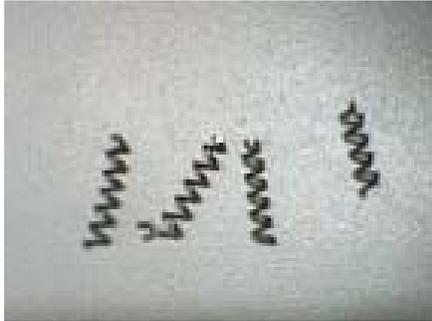
	<p>En determinadas pruebas a altos avances el aluminio mostró una viruta en forma de <i>escama</i>. Cuando se presentaba éste tipo de viruta la superficie del material se dañaba totalmente debido a que la herramienta rasga el material y no lo corta como se espera que ocurra en el proceso.</p>
	<p>En la mayoría de las pruebas se dio la viruta con <i>BUE</i> (por sus siglas en inglés Built-Up Edge) que hace referencia a la adherencia del material en la herramienta; esto puede afectar el proceso de corte debido a que la adhesión de material cubre el filo cortante de la herramienta. Luego de cada prueba se limpiaba el inserto para que el BUE no afectara la siguiente prueba.</p>

Tabla 8: Características de la viruta. Bronce.

BRONCE SAE 40	
Imagen	Características
	<p>El bronce es el material que tiene las mejores características y propiedades para ser mecanizado (dentro de los 3 que se estudiaron). La viruta que resultó del proceso de cilindrado en todos los casos, desde el mínimo avance hasta el máximo, fue discontinua y se denominó viruta Fragmentada debido a que siempre presentó una estructura extremadamente pequeña.</p>

Tabla 9: Características de la viruta. Acero.

ACERO SAE 12L14	
Imagen	Características
	<p>Al igual que el bronce el acero tiene excelentes características para ser mecanizado. La viruta que se obtuvo a bajos avances, en las pruebas iniciales, fue discontinua y pequeña en forma de espiral. Esta viruta es apropiada en el proceso de cilindrado debido a que no se enreda con el material y por lo tanto no lo raya.</p>
	<p>El otro tipo de viruta que se obtuvo del mecanizado de acero fue la viruta continua y en forma de espiral. A pesar de que ésta viruta es continua y en algunos casos larga, no se observó que se hubiera enredado con la pieza ni que la rayara debido a su forma de espiral la hacia consistente y la expulsaba por detrás de la herramienta.</p>

9.2 PRUEBAS DE MEJORAMIENTO

9.2.1 MEJORAMIENTO DESBASTE

Luego de realizar los análisis de la viruta y el comportamiento de los diferentes materiales en el proceso de cilindrado, se prosiguió con las pruebas para encontrar los valores experimentales que lograron el mejor acabado y desbaste. El primer proceso que se llevó a cabo fue el de desbaste y se inició con el aluminio debido a que éste es el material más dúctil y por lo tanto se pensó en partir de los mejores parámetros de éste material para buscar los valores del bronce y del acero.

Debido a que en las pruebas de viruta no se apreciaban cambios sustanciales en el aumento del avance en intervalos de 5 milésimas de milímetro, se determinó para éstas pruebas que el avance aumentaría en intervalos de una centésima. La profundidad se mantuvo constante en 0.5mm al igual que la velocidad del husillo en 1.500rpm y la longitud que se utilizó en todas las pruebas fue de 35mm; estos parámetros iniciales se determinaron con ayuda del Experto2. Se tuvieron 5 piezas disponibles para realizar las

pruebas las cuales se intercambiaban si la temperatura aumentaba a más de 30°C, esto con el fin de mantener la temperatura en unos rangos aceptables que no fueran a alterar las propiedades físicas del material.

La primera prueba se realizó con un avance de 0.04mm/rev y se llegó hasta la cuarta prueba en la que se dañó el material a un avance de 0.07mm/rev; la viruta resultante fue de escama y hubo un daño superficial. En éste valor se pensó inicialmente que se encontraba el límite del aluminio por lo tanto se repitieron las pruebas en intervalos de 2 milésimas de milímetro desde 0.06mm/rev hasta llegar al mejor valor anterior a 0.07mm/rev. Cuando se repitieron las pruebas el material alcanzó el mismo avance en el cual se había dañado con anterioridad (0.07mm/rev) sin que en éste caso se viera afectada la superficie. Lo anterior llevó a tomar la decisión de cambiar el inserto, el cual estaba gastado (el desgaste se debe a la utilización de la herramienta para las asignaturas de la universidad y no a las pruebas realizadas), y a analizar con más detenimiento los resultados derivados del aluminio.

Luego de cambiar el inserto las pruebas continuaron con excelentes resultados y con un mejoramiento en la calidad superficial, en todas las pruebas se obtuvo viruta continua y en la mayoría rebaba, que como se mencionó anteriormente son resultados propios del mecanizado en aluminio. Cuando se llegó a la prueba de avance 0.14mm/rev, las características superficiales del aluminio comenzaron a cambiar de una superficie lisa a una de rayado continuo a lo largo de la pieza mecanizada (Imagen 1). Éstas características son las que se buscan en un proceso de desbaste debido a que se tiene una continuidad en las líneas de cilindrado contando con altos avances que minimicen el tiempo de mecanizado de este proceso. Las pruebas llegaron a 0.16mm/rev donde se volvió a dañar el material, pero previendo el resultado anterior, ésta prueba se repitió dos veces con distintas piezas y se lograron buenos resultados. Lo anterior comprobó que el aluminio tiene problemas de estructura los cuales se aprecian en el proceso de corte (Imagen 2). Con base en esto se tomó la decisión de repetir las pruebas en las que se daña el aluminio, mínimo tres veces antes de tomar una decisión.

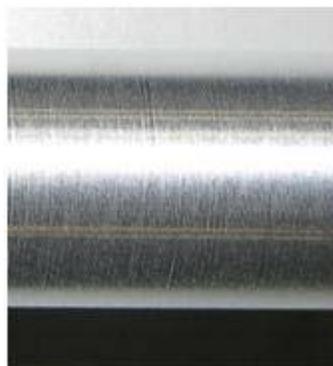


Imagen 1. Superficie Aluminio. Avance 0.2mm/rev

Las pruebas siguieron hasta llegar a 0.25mm/rev, en éste valor el aluminio no resistió el avance y se dañó en todas las repeticiones que se hicieron. Teniendo en cuenta el valor máximo al que puede llegar este material se optó por dejar como valor óptimo⁸ 0.2mm/rev de avance debido a sus características superficiales. Las pruebas siguientes (0.21, 0.22, 0.23, 0.24mm/rev) también mostraron una consistencia en la superficie pero no como el valor seleccionado.



Imagen 2. Aluminio con deformación superficial.

Las pruebas con el valor óptimo se repitieron 10 veces para comprobar la consistencia superficial y para revisar la temperatura, la cual no superó los 27°C. Basándose en el estudio realizado anteriormente y en un análisis visual de la superficie por parte del Experto2 se determinaron los siguientes datos como valores óptimos para el aluminio:

$$\text{Avance} = 0.2\text{mm/rev}$$

$$\text{Prof. de corte} = 0.5\text{mm}$$

$$\text{Vel. Husillo} = 1.500\text{rpm}$$

La siguiente prueba de desbaste que se realizó fue la de bronce. Las pruebas se realizaron desde un avance de 0.05mm/rev y con la misma profundidad de corte y velocidad del husillo que se utilizaron con el aluminio. Se comenzó con éste avance debido a que se decidió abarcar con todas las secuencias que se utilizaron con el aluminio para hacerle un debido seguimiento al bronce y no cómo se había descrito anteriormente en donde se partía de los mejores parámetros del aluminio.

Las pruebas se realizaron en intervalos de 3 centésimas debido a los buenos resultados previos que se obtuvieron en las pruebas de viruta. Cuando las pruebas llegaron a un avance de 0.14mm/rev el bronce comenzó a mostrar las características deseadas para un proceso de desbaste, en las cuales se tiene una continuidad en las líneas por donde pasa

⁸ La palabra “óptimo” en éste estudio no se refiere a un dato considerado ideal universalmente, sino al mejor dato obtenido con las condiciones de trabajo propuestas y con base en el conocimiento del experto.

el inserto. También se pudo observar que el bronce queda con unos “pelos” (residuos de material) en la superficie que no son apreciables a simple vista y no afectan ni el proceso de corte ni el acabado final de la pieza en desbaste.

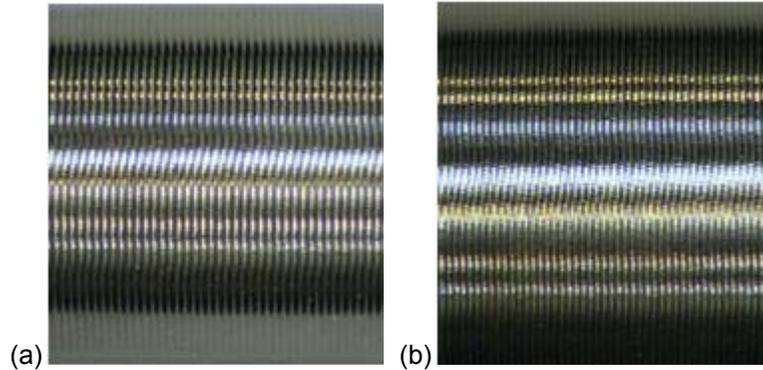


Imagen 3. Superficie Bronce. (a) Avance de 0.44mm/rev (b) Avance de 0.3mm/rev

Las pruebas finalizaron con un avance de 0.44mm/rev (Imagen 3 (a)). Esta decisión de parar las pruebas se determinó, no porque el bronce haya mostrado algún defecto o porque la máquina mostrara indicios de problemas de potencia, sino porque el marcado que dejaba la herramienta era lo suficientemente profundo para que el proceso de acabado elimine el rastro de las líneas que deja el desbaste en una única pasada. Esto se determinó debido a que el proceso de acabado es demasiado lento y no se debe realizar en varias pasadas.

Luego de realizar las pruebas de factores con tres niveles (Explicación que se dará en el capítulo 9.3) se llegó a la conclusión que los valores óptimos para el proceso de desbaste del bronce son:

$$\text{Avance} = 0.3\text{mm/rev}$$

$$\text{Prof. de corte} = 0.5\text{mm}$$

$$\text{Vel. Husillo} = 1.500\text{rpm}$$

El cambio en el avance de 0.44mm/rev a 0.3mm/rev (Imagen 3) se debe a que el anterior valor necesitaba de una profundidad de corte demasiado alta, mayor a 0.5mm (profundidad propia de un proceso de desbaste), para que la superficie resultante del proceso de acabado fuera óptima y no dejara las marcas del desbaste.

Finalmente, el último proceso de mejoramiento de desbaste que se realizó fue el de acero. Los parámetros iniciales que se utilizaron fueron los mismos que para el aluminio y bronce, es decir, la profundidad de corte 0.5mm, la velocidad del husillo 1.500rpm y se inició con un avance de 0.05mm/rev.

Las características que describen al acero como un material de alta maquinabilidad fueron comprobadas durante el transcurso del experimento. Se realizaron pruebas en las cuales se aumentó el avance en intervalos de 3 centésimas hasta llegar a 0.44mm/rev y al igual que el bronce se detuvo el proceso por las características encontradas en la superficie y no por problemas del material (como en el aluminio) ni de la máquina.

La viruta, una característica importante del mecanizado del acero, fue aumentando su largo en la mayoría de los caso cuando los avances eran altos y a pesar de esto, no afectó la superficie del material, debido a que era consistente y no se enredaba en la pieza.

La determinación de los valores óptimos del acero, cambiaron al igual que en el bronce debido a la profundidad en el rayado que dejó el mecanizado, los cuales no beneficiaban el proceso de acabado. La diferencia entre las superficies que tiene el desbaste del acero a un avance de 0.44mm/rev y el valor propuesto posteriormente, 0.3mm/rev, se muestra en la Imagen 4.

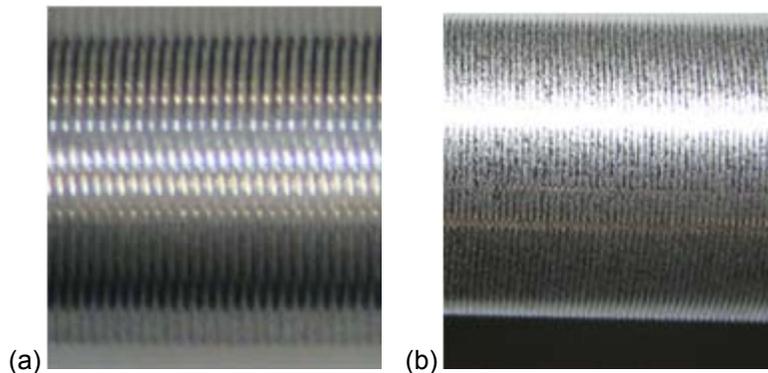


Imagen 4. Superficie Acero (a) Avance 0.44mm/rev (b) Avance 0.3mm/rev

Los parámetros que se determinaron para el proceso de desbaste en el acero son los siguientes:

$$\textit{Avance} = 0.3\textit{mm/rev}$$

$$\textit{Prof. de corte} = 0.5\textit{mm}$$

$$\textit{Vel. Husillo} = 1.500\textit{rpm}$$

9.2.2 MEJORAMIENTO ACABADO

La primera prueba para el proceso de acabado que se desarrolló fue la de aluminio. Los parámetros que se modificaron en primera instancia fueron el avance y la profundidad. El avance tiene que disminuirse notablemente puesto que se debe buscar una superficie lisa que implica quitar el rayado que se obtiene en el desbaste, por lo tanto se comenzó la

prueba con 0.01mm/rev. La profundidad también se disminuyó debido a que no se busca modificar las medidas de la pieza sino, como su nombre lo indica, lograr un buen acabado superficial, éste se determinó en 0.3mm. La velocidad del husillo se mantuvo constante en 1.500rpm.

Las pruebas se llevaron a cabo modificando el avance en intervalos de 0.005mm/rev. La diferenciación entre las superficies obtenidas no era muy notable visualmente ante los ojos de una persona no experta, por lo tanto todas las pruebas de mejoramiento en el acabado superficial las catalogó el Experto2.

Las pruebas de aluminio no fueron tan complicadas para acabado como lo fue en el desbaste puesto que con los parámetros utilizados la superficie no presentó ningún daño o deformación y el aluminio mostró excelentes condiciones para este tipo de proceso. Al igual que en el proceso de desbaste el aluminio presentó una viruta continua pequeña que en algunos casos rayó la superficie de la pieza mecanizada; esta variable que afecta la calidad superficial no se pudo controlar en el transcurso del experimento debido a que la máquina no cuenta con herramientas para evitar el contacto de la viruta con la pieza.

El mejoramiento en la superficie se obtuvo únicamente variando el avance cuando éste llegó a 0.07mm/rev. La Imagen 5 muestra la superficie del aluminio con las condiciones óptimas logradas en el experimento en las que se ve una continuidad en el rayado pero con la menor rugosidad posible.

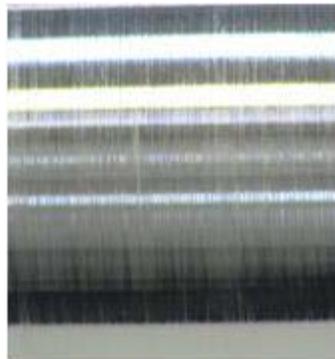


Imagen 5. Acabado superficial de aluminio.

Los parámetros que se tomaron como óptimos para el proceso de acabado de aluminio se muestran a continuación:

$$\textit{Avance} = 0.07\textit{mm/rev}$$

$$\textit{Prof. de corte} = 0.3\textit{mm}$$

$$\textit{Vel. Husillo} = 1.500\textit{rpm}$$

La prueba siguiente a la de aluminio fue la de bronce. Los parámetros iniciales que se utilizaron fueron un avance de 0.01mm/rev, una profundidad de 0.3mm y 1.500rpm para la velocidad del husillo. A pesar de que el bronce es un material altamente mecanizable, no fue fácil encontrar los valores óptimos para determinar una buena calidad superficial. En las primeras pruebas se aumentó el avance a intervalos de una centésima hasta llegar a 0.1mm/rev y no se encontró una calidad que cumpliera los objetivos del experimento, por lo tanto, se aumentó la velocidad del husillo hasta 2.500rpm y se volvieron a desarrollar las pruebas desde 0.01mm/rev; los resultados mejoraron pero tampoco fueron totalmente satisfactorios.

Finalmente, se aumentó la velocidad del husillo a 3.000rpm y se encontró la superficie mecanizada óptima que se buscaba con un avance de 0.025mm/rev. Como se mencionó anteriormente, la determinación de éstos parámetros por medio de un análisis visual no fue fácil para una persona no experta y menos con el bronce que presentaba características muy similares con los diferentes parámetros, por lo tanto se determinó mediante la experiencia del Experto2.

La Imagen 6 muestra la calidad superficial del bronce que se obtuvo con los parámetros óptimos.

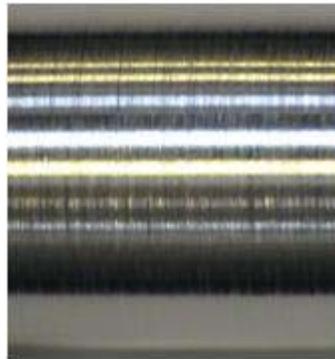


Imagen 6. Acabado superficial de bronce.

Los parámetros óptimos para el proceso de acabado del bronce se muestran a continuación:

$$\text{Avance} = 0.025\text{mm/rev}$$

$$\text{Prof. de corte} = 0.3\text{mm}$$

$$\text{Vel. Husillo} = 3.000\text{rpm}$$

La última prueba de acabado que se realizó fue la de acero. Los parámetros de éste material iniciaron en 1.500rpm de velocidad de husillo, avance 0.01mm/rev y profundidad de corte 0.3mm al igual que en el aluminio y el bronce. Debido a las mínimas variaciones

que se tienen en el proceso de acabado, el intervalo de aumento para el avance fue de 0.005mm/rev.

Al igual que el bronce el acero presentó problemas en la calidad superficial. El avance llegó hasta 0.1mm/rev y no se obtuvieron buenos resultados, es decir, no se encontró una uniformidad en las líneas de corte (Imagen 7). Esta calidad superficial no se esperaba en el acero debido a las características encontradas durante el proceso de desbaste.

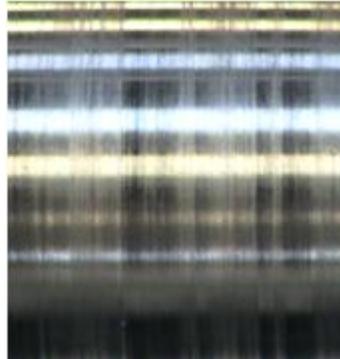


Imagen 7. Superficie de acero con discontinuidad en el acabado

Luego se aumentó la velocidad del husillo a 2.500 y se repitieron las pruebas. Cuando se llegó a un avance de 0.035mm/rev se logró la superficie deseada en la que se veía una mayor uniformidad en las líneas producidas por la herramienta. La Imagen 8 muestra la superficie óptima lograda para el proceso de acabado en el acero.

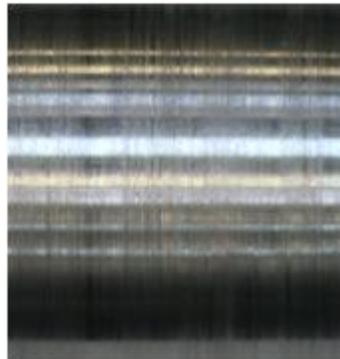


Imagen 8. Acabado superficial de acero.

Los parámetros óptimos para el proceso de acabado de acero se muestran a continuación:

$$\textit{Avance} = 0.035\textit{mm/rev}$$

$$\textit{Prof. de corte} = 0.3\textit{mm}$$

$$\textit{Vel. Husillo} = 2.500\textit{rpm}$$

9.3 DISEÑO EXPERIMENTAL 3³

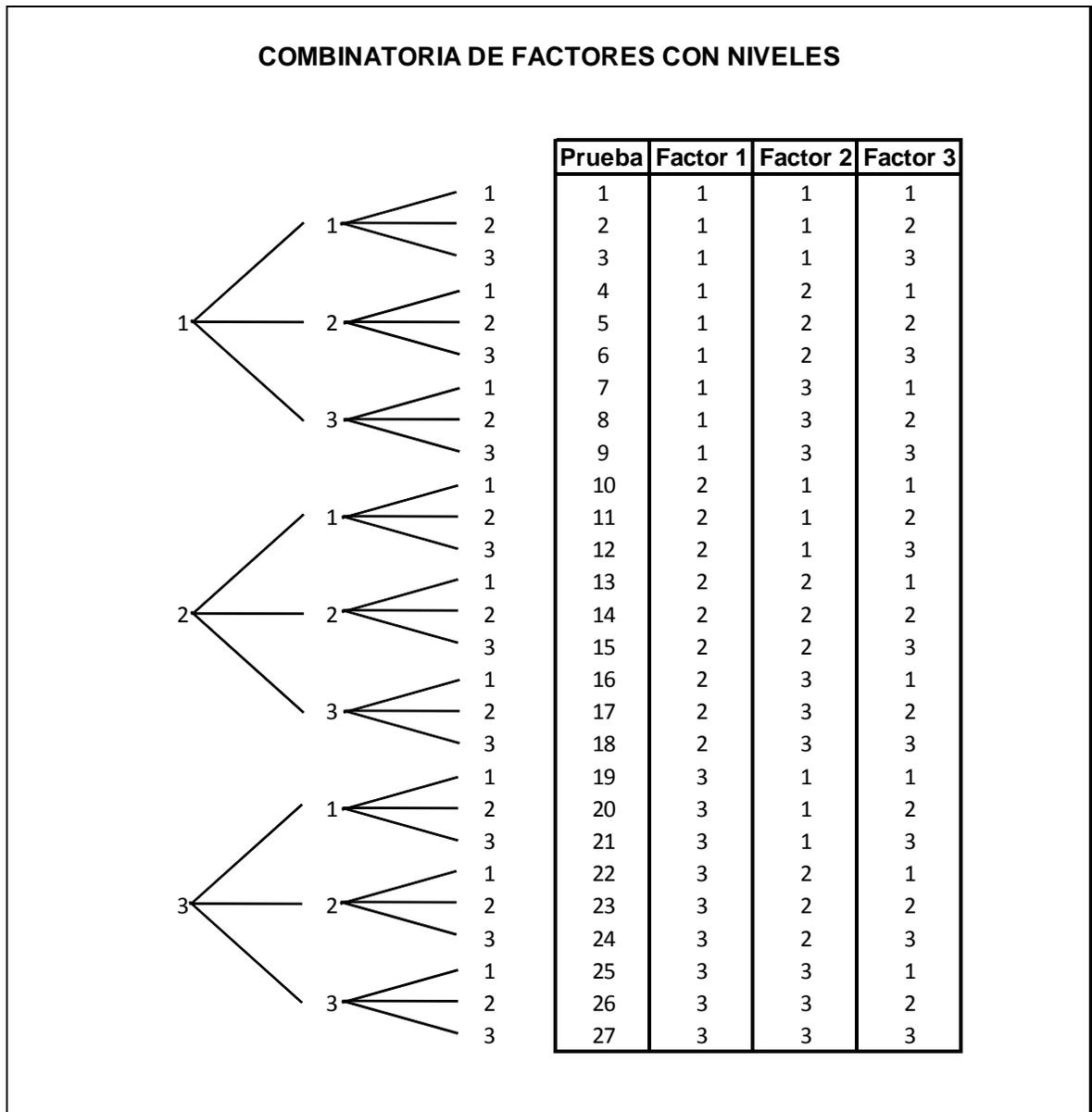
El diseño experimental se desarrolló pensando en solucionar el problema que radica en las variaciones que se encuentran en las calidades superficiales con base en los factores que afectan directamente el proceso de mecanizado. Es por esto que se busca satisfacer dos objetivos principalmente, el primero, desarrollar un experimento el cual muestre la interacción de los factores seleccionados a diferentes niveles para categorizar los resultados dentro de rangos que permitan tener un criterio de selección, según las características esperadas en un proceso determinado. El segundo objetivo que se quiere cumplir es tener la mayor cantidad de resultados posibles para entrenar una red neuronal que prediga los comportamientos de los factores estudiados, con el fin de que éste algoritmo determine la solución a variables de entrada propuestas sin necesidad de tener una comprobación física de la respuesta.

Los resultados del experimento se van a catalogar según las características de superficie que requiere el proceso, con base en un análisis visual por parte del Experto2 al igual que por medio del programa creado en Matlab® para el análisis de superficies a través de imágenes digitales. Se van a tener en cuenta tres niveles posibles de respuesta (Bajo, Medio, Alto), según el tipo de superficie resultante.

En un principio se determinaron cuatro factores para el diseño del experimento, pero el cuarto factor que era Materiales constituido por tres niveles (Aluminio, Bronce y Acero) no se pudo involucrar en el experimento debido a que el aluminio no compartía las mismas propiedades de mecanizado que tenían el bronce y el acero, por éste motivo los niveles, para cada material, debían ser diferentes. Entonces, los tres factores que se definieron como variables que afectan directamente el proceso de corte, independientemente del material que se mecanice son: El Avance, que recorre la pieza en (mm/rev), la Profundidad de Corte, que es la medida que profundiza la herramienta en la pieza y se da en (mm), y la Velocidad del Husillo, que son las revoluciones por minuto a las que gira el husillo. Igualmente para cada factor se determinaron tres niveles, que se indicarán posteriormente según el material y el proceso, para abarcar una mayor cantidad de pruebas.

Se realizó una combinatoria de todos los factores con sus respectivos niveles (Figura 8), cada nivel se representó con un número (1, 2, 3) y se obtuvieron 27 pruebas para desarrollar por cada material.

Figura 8: Combinatoria 3³ (3 Factores – 3 Niveles)



La combinatoria muestra la distribución de los niveles 1, 2 y 3 (los valores se dan según el tipo de material y el tipo de proceso) en cada uno de los factores para la realización de 27 pruebas. El Factor 1 es el Avance, el Factor 2 es la Profundidad de corte y el Factor 3 es la Velocidad del husillo.

9.3.1 PRUEBAS DE DESBASTE

El primer proceso que se desarrolló fue el de desbaste y se comenzó con las pruebas de aluminio, que es el material que tiene mayores problemas de mecanizado. Los primeros datos que se determinaron fueron los niveles de cada factor. Se partió de los valores óptimos establecidos en las pruebas de mejoramiento, para obtener los 2 niveles faltantes necesarios para el desarrollo del experimento. El primer nivel del factor "Avance" es 0.2mm/rev, y con base en este se tomó un nivel por encima en un punto en el cual el aluminio resiste las pruebas sin daño en la superficie; el valor seleccionado fue 0.23mm/rev. El otro nivel se tomó por debajo del punto óptimo en el cual el aluminio estaba dentro de un rango en el que presentaba una "Alta" calidad superficial; el valor por debajo del óptimo fue 0.17mm/rev. Para la profundidad de corte también se tomaron valores por encima y por debajo del punto óptimo (0.5mm); estos valores fueron respectivamente 0.6mm y 0.4mm. En la velocidad del Husillo se tomaron dos valores por encima del punto óptimo (1.500rpm) puesto que, tanto el torno como el aluminio tienen la posibilidad de aumentar estos valores sin afectar la calidad superficial; los valores fueron 1.750rpm y 2.000rpm. El rango no fue tan amplio como el que se le dio al bronce y acero puesto que estos materiales tienen mejores características para el mecanizado.

Los niveles que se establecieron para el bronce, al igual que para el aluminio, partieron de los valores óptimos que se determinaron en las pruebas de mejoramiento. Por lo tanto, el primer nivel del factor Avance es 0.3mm/rev. Dado que en las pruebas iniciales se demostró que el bronce es un material de fácil mecanizado, se optó por tomar dos niveles con rangos amplios por encima del primer nivel los cuales fueron 0.4mm/rev y 0.5mm/rev. El segundo factor, que es la profundidad de corte, se distribuyó con los mismos valores que el aluminio por lo tanto, los tres niveles tienen valores de 0.4mm, 0.5mm y 0.6mm. En el último factor, que es la velocidad del husillo, se aumentaron los valores en un rango mayor al aluminio, debido a las condiciones que tiene el bronce para el mecanizado; estos valores fueron 1.500rpm, 2.000rpm y 2.500rpm.

Debido a la similitud que presentan el bronce y el acero en cuanto al comportamiento en el proceso de corte y a los parámetros óptimos que se establecieron en las pruebas de mejoramiento, se decidió tomar los mismos datos de los niveles que se determinaron para los factores del bronce.

Las pruebas se realizaron con base en la distribución de niveles dada por la Figura 8. Las tablas 10, 11 y 12 muestran los datos obtenidos de las 27 pruebas, de cada material, en donde se tomaron los diámetros iniciales y finales de la misma pieza en tres puntos diferentes para obtener un promedio y tener una mejor validación de los datos; las medidas se tomaron en pulgadas (in) debido a que el calibrador cuenta con más cifras significativas para ésta medida, que para milímetros, lo que implica una mayor precisión. Las tablas también muestran la diferencia entre el promedio de los datos del diámetro inicial y el diámetro final que se utiliza para hallar la velocidad de corte con base en la Fórmula 1.

Por otra parte, las tablas 10, 11 y 12 muestran la viruta obtenida en cada una de las pruebas y la calidad que se determinó para la superficie resultante dada por los parámetros establecidos.

9.3.1.1 RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS PRUEBAS DE DESBASTE

Tabla 10: Pruebas de desbaste de aluminio.

DESBASTE - ALUMINIO SAE 1060															
FACTORES			DIAMETRO								RESULTADOS				
AVANCE (mm/rev)	PROF. CORTE (mm)	VEL. HUSILLO (rpm)	INICIAL (in)			PROM. INICIAL (in)	FINAL (in)			PROM. FINAL (in)	DIFERENCIA (mm)	ERROR ABSOLUTO	VIRUTA	CALIDAD	VELOCIDAD DE CORTE
0,17	0,4	1500	1,0585	1,0585	1,0585	1,05850	1,0425	1,0430	1,0445	1,04333	0,38523	0,01477	Escamas	Baja	126,696819
0,17	0,4	2000	0,9910	0,9915	0,9915	0,99133	0,9755	0,9750	0,9750	0,97517	0,41063	0,01063	Continua BUE	Media	158,209768
0,17	0,4	1750	0,9555	0,9560	0,9560	0,95583	0,9400	0,9405	0,9425	0,94100	0,37677	0,02323	Continua BUE	Media	133,476193
0,17	0,5	1500	0,9205	0,9205	0,9205	0,92050	0,9005	0,9005	0,9035	0,90150	0,48260	0,01740	Continua BUE	Media	110,178953
0,17	0,5	2000	0,8805	0,8810	0,8810	0,88083	0,8605	0,8605	0,8610	0,86067	0,51223	0,01223	Continua BUE	Media	140,574752
0,17	0,5	1750	0,8465	0,8470	0,8460	0,84650	0,8300	0,8245	0,8245	0,82633	0,51223	0,01223	Continua	Baja	118,208471
0,17	0,6	1500	0,7830	0,7830	0,7820	0,78267	0,7575	0,7575	0,7590	0,75800	0,62653	0,02653	Continua BUE	Baja	93,6810363
0,17	0,6	2000	0,7405	0,7400	0,7400	0,74017	0,7135	0,7130	0,7135	0,71333	0,68157	0,08157	Continua BUE	Baja	118,12535
0,17	0,6	1750	0,6980	0,6985	0,6965	0,69767	0,6705	0,6715	0,6715	0,67117	0,67310	0,07310	Continua BUE	Media	97,4248199
0,2	0,4	1500	0,6575	0,6575	0,6550	0,65667	0,6390	0,6375	0,6380	0,63817	0,46990	0,06990	Escamas	Baja	78,5995066
0,2	0,4	2000	0,8135	0,8140	0,8140	0,81383	0,7965	0,7940	0,7945	0,79500	0,47837	0,07837	Continua BUE	Alta	129,882027
0,2	0,4	1750	0,7740	0,7735	0,7750	0,77417	0,7595	0,7590	0,7600	0,75950	0,37253	0,02747	Continua Esc.	Baja	108,10757
0,2	0,5	1500	0,7230	0,7230	0,7240	0,72333	0,7035	0,7030	0,7035	0,70333	0,50800	0,00800	Continua BUE	Alta	86,5791519
0,2	0,5	2000	0,6840	0,6845	0,6835	0,68400	0,6630	0,6635	0,6640	0,66350	0,52070	0,02070	Continua BUE	Alta	109,161548
0,2	0,5	1750	0,6470	0,6445	0,6445	0,64533	0,6235	0,6235	0,6240	0,62367	0,55033	0,05033	Continua	Alta	90,1167947
0,2	0,6	1500	0,8410	0,8410	0,8435	0,84183	0,8175	0,8175	0,8175	0,81750	0,61807	0,01807	Continua	Alta	100,762972
0,2	0,6	2000	0,8055	0,8045	0,8040	0,80467	0,7780	0,7780	0,7785	0,77817	0,67310	0,07310	Continua BUE	Alta	128,419092
0,2	0,6	1750	0,8425	0,8430	0,8415	0,84233	0,8170	0,8170	0,8175	0,81717	0,63923	0,03923	Continua	Alta	117,626622
0,23	0,4	1500	0,8050	0,8050	0,8045	0,80483	0,7890	0,7885	0,7885	0,78867	0,41063	0,01063	Continua	Media	96,3342684
0,23	0,4	2000	0,7525	0,7520	0,7525	0,75233	0,7380	0,7380	0,7380	0,73800	0,36407	0,03593	Continua Esc.	Baja	120,067064
0,23	0,4	1750	0,7685	0,7675	0,7680	0,76800	0,7500	0,7500	0,7500	0,75000	0,45720	0,05720	Escamas	Baja	107,246433
0,23	0,5	1500	0,7045	0,7040	0,7060	0,70483	0,6870	0,6840	0,6840	0,68500	0,50377	0,00377	Continua BUE	Media	84,3648004
0,23	0,5	2000	0,6670	0,6640	0,6640	0,66500	0,6445	0,6440	0,6440	0,64417	0,52917	0,02917	Continua	Media	106,129283
0,23	0,5	1750	0,6240	0,6245	0,6250	0,62450	0,6050	0,6035	0,6035	0,60400	0,52070	0,02070	Continua	Media	87,207549
0,23	0,6	1500	0,6245	0,6260	0,6250	0,62517	0,6005	0,6010	0,6010	0,60083	0,61807	0,01807	Continua	Alta	74,8291242
0,23	0,6	2000	0,5845	0,5845	0,5860	0,58500	0,5600	0,5600	0,5600	0,56000	0,63500	0,03500	Continua	Alta	93,3618505
0,23	0,6	1750	0,5870	0,5875	0,5865	0,58700	0,5615	0,5610	0,5610	0,56117	0,65617	0,05617	Continua	Alta	81,9709068

Tabla 11: Pruebas de desbaste de bronce.

DESBASTE - BRONCE SAE 40																
FACTORES			DIAMETRO								RESULTADOS					
AVANCE (mm/rev)	PROF. CORTE (mm)	VEL. HUSILLO (rpm)	INICIAL (in)			PROM. INICIAL (in)	FINAL (in)			PROM. FINAL (in)	DIFERENCIA (mm)	ERROR ABSOLUTO	VIRUTA	CALIDAD	VELOCIDAD DE CORTE	
0,3	0,4	1500	1,0230	1,0215	1,0210	1,02183	1,0055	1,0045	1,0045	1,00483	0,43180	0,03180	Polvo	Alta	122,308014	
0,3	0,4	2000	0,9850	0,9850	0,9850	0,98500	0,9690	0,9690	0,9695	0,96917	0,40217	0,00217	Polvo	Alta	157,199013	
0,3	0,4	2500	0,9530	0,9550	0,9545	0,95417	0,9365	0,9370	0,9370	0,93683	0,44027	0,04027	Polvo	Alta	190,34779	
0,3	0,5	1500	0,9150	0,9150	0,9150	0,91500	0,8945	0,8945	0,8945	0,89450	0,52070	0,02070	Polvo	Alta	109,520632	
0,3	0,5	2000	0,8750	0,8755	0,8750	0,87517	0,8560	0,8555	0,8555	0,85567	0,49530	0,00470	Polvo	Alta	139,670392	
0,3	0,5	2500	0,8415	0,8415	0,8420	0,84167	0,8220	0,8220	0,8220	0,82200	0,49953	0,00047	Polvo	Alta	167,905037	
0,3	0,6	1500	0,8220	0,8220	0,8220	0,82200	0,7990	0,7985	0,7980	0,79850	0,59690	0,00310	Polvo	Alta	98,389027	
0,3	0,6	2000	0,7980	0,7980	0,7985	0,79817	0,7755	0,7750	0,7750	0,77517	0,58420	0,01580	Polvo	Alta	127,381738	
0,3	0,6	2500	0,7750	0,7755	0,7750	0,77517	0,7505	0,7505	0,7505	0,75050	0,62653	0,02653	Polvo	Alta	154,638877	
0,4	0,4	1500	0,7505	0,7505	0,7505	0,75050	0,7385	0,7380	0,7375	0,73800	0,31750	0,08250	Polvo	Media	89,8308574	
0,4	0,4	2000	0,7375	0,7375	0,7380	0,73767	0,7225	0,7220	0,7220	0,72217	0,39370	0,00630	Polvo	Media	117,726368	
0,4	0,4	2500	0,7220	0,7220	0,7225	0,72217	0,7070	0,7065	0,7060	0,70650	0,39793	0,00207	Polvo	Media	144,065847	
0,4	0,5	1500	0,7060	0,7065	0,7065	0,70633	0,6870	0,6865	0,6860	0,68650	0,50377	0,00377	Polvo	Media	84,5443424	
0,4	0,5	2000	0,6865	0,6865	0,6860	0,68633	0,6700	0,6675	0,6675	0,66833	0,45720	0,04280	Polvo	Media	109,533932	
0,4	0,5	2500	0,6675	0,6675	0,6700	0,66833	0,6475	0,6475	0,6470	0,64733	0,53340	0,03340	Polvo	Media	133,326574	
0,4	0,6	1500	0,6470	0,6475	0,6475	0,64733	0,6245	0,6240	0,6235	0,62400	0,59267	0,00733	Polvo	Media	77,4823563	
0,4	0,6	2000	0,6240	0,6235	0,6245	0,62400	0,6000	0,6000	0,5995	0,59983	0,61383	0,01383	Polvo	Media	99,5859738	
0,4	0,6	2500	0,6000	0,5995	0,6000	0,59983	0,5775	0,5775	0,5765	0,57717	0,57573	0,02427	Polvo	Baja	119,661432	
0,5	0,4	1500	0,5765	0,5775	0,5775	0,57717	0,5635	0,5635	0,5635	0,56350	0,34713	0,05287	Polvo	Baja	69,083795	
0,5	0,4	2000	0,5635	0,5635	0,5635	0,56350	0,5475	0,5480	0,5480	0,54783	0,39793	0,00207	Polvo	Baja	89,930603	
0,5	0,4	2500	0,5475	0,5480	0,5480	0,54783	0,5325	0,5325	0,5320	0,53233	0,39370	0,00630	Polvo	Baja	109,287893	
0,5	0,5	1500	0,5320	0,5325	0,5325	0,53233	0,5130	0,5120	0,5120	0,51233	0,50800	0,00800	Polvo	Baja	63,717468	
0,5	0,5	2000	0,5120	0,5120	0,5130	0,51233	0,4935	0,4925	0,4920	0,49267	0,49953	0,00047	Polvo	Baja	81,7647659	
0,5	0,5	2500	0,4935	0,4925	0,4920	0,49267	0,4730	0,4730	0,4730	0,47300	0,49953	0,00047	Polvo	Baja	98,2826318	
0,5	0,6	1500	0,4730	0,4730	0,4730	0,47300	0,4495	0,4490	0,4480	0,44883	0,61383	0,01383	Polvo	Baja	56,6155837	
0,5	0,6	2000	0,4495	0,4490	0,4480	0,44883	0,4260	0,4260	0,4255	0,42583	0,58420	0,01580	Polvo	Baja	71,6306163	
0,5	0,6	2500	0,4260	0,4260	0,4255	0,42583	0,4020	0,4020	0,4010	0,40167	0,61383	0,01383	Polvo	Baja	84,9499744	

Tabla 12: Pruebas de desbaste de acero.

DESBASTE - ACERO SAE 12L14																		
FACTORES			DIAMETRO								DIFERENCIA		ERROR		VIRUTA		CALIDAD	VELOCIDAD DE CORTE
AVANCE (mm/rev)	PROF. CORTE (mm)	VEL. HUSILLO (rpm)	INICIAL (in)			PROM. INICIAL (in)	FINAL (in)			PROM. FINAL (in)	(mm)	ABSOLUTO						
0,3	0,4	1500	0,8815	0,8810	0,8820	0,88150	0,8655	0,8650	0,8650	0,86517	0,41487	0,01487	Pequeña	Alta	105,510861			
0,3	0,4	2000	0,8315	0,8305	0,8300	0,83067	0,8135	0,8135	0,8135	0,81350	0,43603	0,03603	Pequeña	Alta	132,568508			
0,3	0,4	2500	0,7935	0,7940	0,7935	0,79367	0,7780	0,7780	0,7780	0,77800	0,39793	0,00207	Peq. Espiral	Alta	158,329463			
0,3	0,5	1500	0,7565	0,7555	0,7510	0,75433	0,7385	0,7385	0,7380	0,73833	0,40640	0,09360	Pequeña	Alta	90,289687			
0,3	0,5	2000	0,7175	0,7155	0,7150	0,71600	0,6990	0,6990	0,6990	0,69900	0,43180	0,06820	Peq. Espiral	Alta	114,268521			
0,3	0,5	2500	0,6795	0,6795	0,6800	0,67967	0,6600	0,6610	0,6600	0,66033	0,49107	0,00893	Pequeña	Alta	135,587474			
0,3	0,6	1500	0,6400	0,6400	0,6405	0,64017	0,6165	0,6165	0,6165	0,61650	0,60113	0,00113	Med. Espiral	Alta	76,6245444			
0,3	0,6	2000	0,5975	0,5980	0,5980	0,59783	0,5730	0,5730	0,5730	0,57300	0,63077	0,03077	Med. Espiral	Alta	95,4099595			
0,3	0,6	2500	0,5535	0,5535	0,5535	0,55350	0,5300	0,5305	0,5300	0,53017	0,59267	0,00733	Med. Espiral	Alta	110,418342			
0,4	0,4	1500	0,5125	0,5140	0,5130	0,51317	0,4970	0,4970	0,4955	0,49650	0,42333	0,02333	Med. Espiral	Media	61,42332			
0,4	0,4	2000	0,9420	0,9425	0,9420	0,94217	0,9265	0,9265	0,9265	0,92650	0,39793	0,00207	Pequeña	Media	150,363117			
0,4	0,4	2500	0,9080	0,9075	0,9075	0,90767	0,8905	0,8905	0,8910	0,89067	0,43180	0,03180	Pequeña	Media	181,071452			
0,4	0,5	1500	0,8715	0,8720	0,8715	0,87167	0,8515	0,8510	0,8505	0,85100	0,52493	0,02493	Pequeña	Media	104,333863			
0,4	0,5	2000	0,8120	0,8120	0,8120	0,81200	0,7925	0,7925	0,7925	0,79250	0,49530	0,00470	Pequeña	Media	129,58944			
0,4	0,5	2500	0,7730	0,7735	0,7730	0,77317	0,7530	0,7535	0,7535	0,75333	0,50377	0,00377	Pequeña	Media	154,239895			
0,4	0,6	1500	0,7330	0,7330	0,7330	0,73300	0,7100	0,7100	0,7100	0,71000	0,58420	0,01580	Med. Espiral	Media	87,7362005			
0,4	0,6	2000	0,6900	0,6905	0,6900	0,69017	0,6660	0,6665	0,6665	0,66633	0,60537	0,00537	Med. Espiral	Media	110,145705			
0,4	0,6	2500	0,6465	0,6475	0,6470	0,64700	0,6230	0,6230	0,6230	0,62300	0,60960	0,00960	Med. Espiral	Baja	129,070763			
0,5	0,4	1500	0,6075	0,6075	0,6075	0,60750	0,5940	0,5945	0,5940	0,59417	0,33867	0,06133	Pequeña	Baja	72,7145182			
0,5	0,4	2000	0,5785	0,5785	0,5785	0,57850	0,5630	0,5630	0,5630	0,56300	0,39370	0,00630	Pequeña	Baja	92,3244966			
0,5	0,4	2500	0,5435	0,5430	0,5430	0,54317	0,5275	0,5275	0,5275	0,52750	0,39793	0,00207	Pequeña	Baja	108,356934			
0,5	0,5	1500	0,5120	0,5145	0,5130	0,51317	0,4930	0,4920	0,4930	0,49267	0,52070	0,02070	Pequeña	Baja	61,42332			
0,5	0,5	2000	0,4730	0,4735	0,4735	0,47333	0,4530	0,4530	0,4535	0,45317	0,51223	0,01223	Pequeña	Baja	75,5406426			
0,5	0,5	2500	0,6110	0,6105	0,6120	0,61117	0,5905	0,5905	0,5905	0,59050	0,52493	0,02493	Pequeña	Baja	121,922331			
0,5	0,6	1500	0,5675	0,5680	0,5685	0,56800	0,5475	0,5475	0,5475	0,54750	0,52070	0,07930	Med. Espiral	Baja	67,9865783			
0,5	0,6	2000	0,5315	0,5320	0,5315	0,53167	0,5080	0,5085	0,5085	0,50833	0,59267	0,00733	Med. Espiral	Baja	84,8502288			
0,5	0,6	2500	0,4645	0,4650	0,4645	0,46467	0,4410	0,4410	0,4410	0,44100	0,60113	0,00113	Med. Espiral	Baja	92,69688			

La Tabla 10 muestra los resultados obtenidos de las 27 pruebas que se realizaron en el aluminio. Se determinó el error absoluto de la diferencia entre la profundidad obtenida experimentalmente con la planteada teóricamente. Los valores máximos y mínimos que se obtuvieron, respectivamente, son $\pm 0.0815\text{mm}$ y $\pm 0.0037\text{mm}$. El dato máximo muestra que el proceso de corte en el torno *Emco PC Turn 125* arroja resultados dentro de las tolerancias aceptadas en la industria⁹ y el mínimo muestra que hay mecanizados con solo 3 milésimas de milímetro de desfase, con respecto al dato teórico, en los procesos de control numérico para el aluminio.

En el caso del aluminio la viruta va ligada a la calidad superficial cuando se tiene del tipo de Escama, puesto que en todas las ocasiones en las que se da ésta viruta, se encuentran grandes defectos en la superficie que la catalogan en un rango de calidad “Baja”. Los otros dos rangos de calidades en los que se cataloga la superficie (Media y Alta) no tienen una relación directa con la viruta puesto que se da del tipo continua y en algunos casos con BUE y ésta no determina una diferenciación entre los rangos. Por lo tanto, la calidad de las superficies para estos niveles se da por la homogeneidad que resulta del proceso de corte, y es determinada por el Experto2.

Se tienen 7 calidades bajas, 9 medias y 11 altas para entrenar la red neuronal. La velocidad de corte máxima que se dio, con un avance de 0.2mm/rev , 0.6mm de profundidad de corte y 2.000rpm de velocidad del husillo, para una calidad alta, fue de 128.7 m/min .

La Tabla 11 muestra los resultados de las 27 pruebas de bronce que se realizaron. Se determinó el error experimental absoluto, resultado de la diferencia entre el diámetro esperado y el obtenido en las pruebas. Los valores máximos y mínimos de éste error, son respectivamente, $\pm 0.0825\text{mm}$ y $\pm 0.0004\text{mm}$. El primer valor se encuentra dentro del rango admisible para el proceso de mecanizado en desbaste y el segundo muestra que el torno alcanzó a mecanizar una pieza de bronce con un error, solamente, de 4 diezmilésimas de milímetro.

Luego de realizadas las pruebas, se analizaron las diferentes superficies obtenidas y se determinó con ayuda del Experto2, que la profundidad en los trazos de corte que deja el inserto perjudica el proceso de acabado cuando ésta es alta. Por lo tanto, se establecieron como calidades bajas las piezas que tenían una rugosidad alta y que no permiten que se borre el trazado de desbaste en el proceso de acabado.

Así mismo, se determinó como calidad “Media” las superficies que necesitan de una profundidad alta en el proceso de acabado para eliminar las huellas que deja el proceso de desbaste.

⁹ Tolerancia aceptada en la industria para el proceso de desbaste: $0.13 (\pm\text{mm})$ en máquinas de control numérico. S. Kalpakjian, *Manufactura, ingeniería y tecnología*, Pearson Educación, 4ta Edición.

La viruta que se produjo como residuo de todas las pruebas realizadas fue fragmentada; lo que muestra que el bronce tiene una estructura estable que no se afecta con la variación de los parámetros propuestos, al menos dentro del rango en los que se evaluaron.

La velocidad de corte máxima que resultó de las pruebas de desbaste de bronce fue de 190.34m/min y se determinó con un avance de 0.3mm/rev, una profundidad de 0.4mm y una velocidad del husillo de 2.500rpm; esta velocidad de corte se dio en una pieza que cuenta con las características superficiales que se encuentran dentro del rango de calidad alta.

Finalmente, la Tabla 12 muestra los resultados de las pruebas de acero. Cada pieza de éste material se midió en tres puntos diferentes, cuando se tenía el diámetro inicial y luego el final, para obtener un promedio de cada dato y con esto hallar la diferencia resultante con el fin de determinar el error que tuvo el proceso de mecanizado con respecto a la parte teórica. El valor máximo que se encontró fue de 0.093mm, lo que indica que a pesar de que el error es alto, éste se encuentra dentro de la tolerancia aceptada en la industria.

La viruta en todos los casos fue en espiral aunque la longitud varió en las diferentes pruebas. El único material que presentó viruta con BUE fue el aluminio por lo tanto ni el bronce ni el acero se afectaron superficialmente por algún tipo de rastro que pueda producir la adherencia de material en la herramienta durante el proceso de corte.

La determinación de los rangos en los que se encuentra la calidad superficial de las diferentes piezas de acero se distribuyó igual al bronce puesto que presentó los mismos problemas de profundidad que afectan el proceso de acabado. Por este motivo, la calidad "Alta" se dio en los menores avances tal y como se planteó en las pruebas de mejoramiento, en la calidad "Media" se encuentran las superficies que necesitan de una alta profundidad para producir un buen acabado y borrar las marcas dejadas en el proceso de desbaste, y por último, en la calidad "Baja", se encuentran las piezas que tienen una profundidad que no permite el borrado de las marcas en una sola pasada en el proceso de acabado; pues esto implicaría mayor tiempo de mecanizado y desgaste de la herramienta.

El valor máximo que se alcanzó en la velocidad de corte, con una calidad Alta, fue de 158.32m/min y se obtuvo con un avance de 0.3mm/rev, una profundidad de corte de 0.4mm y una velocidad del husillo de 2.500rpm.

La sección 10.1 muestra la categorización con mayor detalle de las superficies de aluminio, bronce y acero en el proceso de desbaste.

9.3.2 PRUEBAS DE ACABADO

Las tablas que se muestran a continuación corresponden a los resultados de las pruebas de acabado que se realizaron para obtener los datos necesarios para el análisis superficial y para el entrenamiento de las redes neuronales, también se tomó el diámetro inicial de cada pieza y el final para determinar el error experimental. Así mismo las tablas contienen el resultado de viruta que arroja cada experimento y la velocidad de corte dada por la Fórmula 1. La distribución de los tres factores con sus respectivos niveles se realizó con base en la Figura 8.

Los tres niveles que se utilizaron para cada factor parten de los valores óptimos que se encontraron en las pruebas de mejoramiento. Los primeros niveles que se determinaron fueron para el aluminio. El avance óptimo tiene el primer nivel en 0.07mm/rev y los otros dos niveles se establecieron por debajo a éste valor debido a que no se quiere sobrepasar el avance y alterar las características de la superficie; por lo tanto, se propusieron 0.06mm/rev y 0.05mm/rev para completar los niveles. El siguiente factor es la profundidad de corte, para la cual se establecieron valores de 0.1mm, 0.2mm, 0.3mm porque se considera que la profundidad debe estar en un rango pequeño puesto que no se busca alterar las medidas de la pieza sino mejorar el terminado de ésta. El último factor, que es la velocidad del husillo, parte de 1.500rpm y aumenta su valor a 2.500rpm y 3.000rpm buscando que esto beneficie el acabado superficial, como sucedió en el bronce y en el acero.

Los siguientes niveles que se establecieron fueron los del bronce, al igual que en el aluminio se partió de los valores óptimos determinados en las pruebas de mejoramiento para completar los niveles faltantes. El primer avance es de 0.025mm/rev y se determinó en aumentarlo a 0.035mm/rev debido a que el acero presenta características de corte similares al bronce, y para el tercer nivel se determinó un valor intermedio, el cual fue de 0.03mm/rev. La profundidad de corte se estableció al igual que en el aluminio en 0.1mm, 0.2mm, 0.3mm por las razones expuestas anteriormente. Por último, se determinaron los niveles para la velocidad del husillo. Éste valor partió del nivel óptimo que es de 3.000rpm y debido a que es un valor alto los siguientes niveles se propusieron por debajo de éste los cuales fueron de 2.500rpm (que se tomó del acero) y 2.000rpm. No se amplió el rango a 1.500rpm como en el aluminio porque las pruebas iniciales mostraron que el bronce se comporta mejor con velocidades de husillo altas.

Los datos de los tres factores que se determinaron para el acero en el proceso de acabado fueron los mismos que para el bronce debido a que estos dos materiales tienen comportamientos similares tanto en desbaste como en acabado. Además, los dos comparten niveles que se establecieron previamente en las pruebas de mejoramiento.

9.3.2.1 RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS PROCESO DE ACABADO

Tabla 13: Pruebas de acabado de aluminio.

ACABADO - ALUMINIO SAE 1060																		
FACTORES			DIAMETRO									DIFERENCIA		ERROR		VIRUTA	CALIDAD	VELOCIDAD
AVANCE (mm/rev)	PROF. CORTE (mm)	VEL. HUSILLO (rpm)	INICIAL (in)			PROM. INICIAL (in)	FINAL (in)			PROM. FINAL (in)	(mm)	ABSOLUTO			DE CORTE			
0,05	0,1	1500	1,1745	1,1745	1,1745	1,17450	1,1695	1,1700	1,1695	1,16967	0,12277	0,02277	Continua - Corta	Alta	140,5814018			
0,05	0,1	2500	1,1695	1,1700	1,1695	1,16967	1,1655	1,1655	1,1655	1,16550	0,10583	0,00583	Continua - Corta	Media	233,3381292			
0,05	0,1	3000	1,1655	1,1655	1,1605	1,16383	1,1605	1,1595	1,1605	1,16017	0,09313	0,00687	Continua - Corta	Media	278,6093171			
0,05	0,2	1500	1,1605	1,1605	1,1595	1,16017	1,1535	1,1525	1,1535	1,15317	0,17780	0,02220	Continua - Corta	Media	138,865778			
0,05	0,2	2500	1,1535	1,1525	1,1535	1,15317	1,1460	1,1455	1,1460	1,14583	0,18627	0,01373	Continua - Corta	Media	230,0465255			
0,05	0,2	3000	1,1460	1,1460	1,1455	1,14583	1,1380	1,1375	1,1380	1,13783	0,20320	0,00320	Continua - Corta	Alta	274,3003086			
0,05	0,3	1500	1,1545	1,1545	1,1545	1,15450	1,1420	1,1420	1,1420	1,14200	0,31750	0,01750	Continua - Corta	Baja	138,1875082			
0,05	0,3	2500	1,1380	1,1375	1,1380	1,13783	1,1275	1,1265	1,1265	1,12683	0,27940	0,02060	Continua - Corta	Baja	226,9876614			
0,05	0,3	3000	1,1265	1,1265	1,1265	1,12650	1,1145	1,1145	1,1145	1,11450	0,30480	0,00480	Continua - Corta	Media	269,6721143			
0,06	0,1	1500	1,1420	1,1420	1,1420	1,14200	1,1380	1,1380	1,1380	1,13800	0,10160	0,00160	Continua - Corta	Media	136,6913247			
0,06	0,1	2500	1,1380	1,1380	1,1380	1,13800	1,1340	1,1340	1,1340	1,13400	0,10160	0,00160	Continua - Corta	Alta	227,0209099			
0,06	0,1	3000	1,1340	1,1340	1,1340	1,13400	1,1280	1,1275	1,1275	1,12767	0,16087	0,06087	Continua - Corta	Alta	271,4675345			
0,06	0,2	1500	1,1280	1,1275	1,1275	1,12767	1,1225	1,1225	1,1225	1,12250	0,13123	0,06877	Continua - Corta	Alta	134,9757009			
0,06	0,2	2500	1,1145	1,1145	1,1145	1,11450	1,1065	1,1065	1,1065	1,10650	0,20320	0,00320	Continua - Corta	Alta	222,3328683			
0,06	0,2	3000	1,1065	1,1065	1,1065	1,10650	1,0985	1,0985	1,0985	1,09850	0,20320	0,00320	Continua - Corta	Alta	264,8843271			
0,06	0,3	1500	1,0985	1,0985	1,0985	1,09850	1,0870	1,0870	1,0870	1,08700	0,29210	0,00790	Continua - Corta	Baja	131,4846061			
0,06	0,3	2500	1,0870	1,0870	1,0870	1,08700	1,0750	1,0750	1,0750	1,07500	0,30480	0,00480	Continua - Corta	Baja	216,8468621			
0,06	0,3	3000	1,0750	1,0750	1,0750	1,07500	1,0630	1,0630	1,0630	1,06317	0,30057	0,00057	Continua - Corta	Baja	257,3435622			
0,07	0,1	1500	1,0630	1,0630	1,0630	1,06300	1,0565	1,0560	1,0545	1,05567	0,18627	0,08627	Continua - Corta	Alta	127,2354449			
0,07	0,1	2500	1,0565	1,0560	1,0540	1,05550	1,0520	1,0515	1,0510	1,05150	0,10160	0,00160	Continua - Corta	Alta	210,5628914			
0,07	0,1	3000	1,0525	1,0515	1,0520	1,05200	1,0475	1,0475	1,0470	1,04733	0,11853	0,01853	Continua - Corta	Media	251,8376069			
0,07	0,2	1500	1,0470	1,0475	1,0475	1,04733	1,0400	1,0400	1,0400	1,04000	0,18627	0,01373	Continua - Corta	Media	125,3602283			
0,07	0,2	2500	1,0400	1,0400	1,0400	1,04000	1,0325	1,0315	1,0315	1,03183	0,20743	0,00743	Continua - Corta	Alta	207,4707788			
0,07	0,2	3000	1,0315	1,0315	1,0325	1,03183	1,0240	1,0235	1,0240	1,02383	0,20320	0,00320	Continua - Corta	Alta	247,0099215			
0,07	0,3	1500	1,0240	1,0235	1,0240	1,02383	1,0125	1,0125	1,0120	1,01233	0,29210	0,00790	Continua - Corta	Baja	122,5474033			
0,07	0,3	2500	1,0125	1,0125	1,0120	1,01233	1,0005	1,0005	1,0005	1,00050	0,30057	0,00057	Continua - Corta	Media	201,9515241			
0,07	0,3	3000	1,0005	1,0005	1,0005	1,00050	0,9890	0,9890	0,9890	0,98900	0,29210	0,00790	Continua - Corta	Media	239,5090549			

Tabla 14: Pruebas de acabado de bronce.

ACABADO - BRONCE SAE 40															
FACTORES			DIAMETRO												
AVANCE (mm/rev)	PROF. CORTE (mm)	VEL. HUSILLO (rpm)	INICIAL (in)			PROM. INICIAL (in)	FINAL (in)			PROM. FINAL (in)	DIFERENCIA (mm)	ERROR ABSOLUTO	VIRUTA	CALIDAD	VELOCIDAD DE CORTE
0,025	0,1	2000	0,8415	0,8415	0,8415	0,84150	0,8345	0,8345	0,8345	0,83450	0,17780	0,07780	Polvo	Baja	134,297431
0,025	0,1	2500	0,8345	0,8345	0,8345	0,83450	0,8285	0,8280	0,8270	0,82783	0,16933	0,06933	Polvo	Baja	166,475351
0,025	0,1	3000	0,8035	0,8035	0,8030	0,80333	0,7975	0,7970	0,7965	0,79700	0,16087	0,06087	Polvo	Baja	192,309453
0,025	0,2	2000	0,8270	0,8270	0,8275	0,82717	0,8190	0,8190	0,8190	0,81900	0,20743	0,00743	Polvo	Baja	132,009933
0,025	0,2	2500	0,8190	0,8190	0,8190	0,81900	0,8120	0,8110	0,8110	0,81133	0,19473	0,00527	Polvo	Baja	163,383238
0,025	0,2	3000	0,8120	0,8110	0,8110	0,81133	0,8035	0,8035	0,8030	0,80333	0,20320	0,00320	Polvo	Baja	194,224568
0,025	0,3	2000	0,7975	0,7970	0,7965	0,79700	0,7855	0,7850	0,7855	0,78533	0,29633	0,00367	Polvo	Baja	127,195547
0,025	0,3	2500	0,7855	0,7850	0,7855	0,78533	0,7750	0,7750	0,7750	0,77500	0,26247	0,03753	Polvo	Baja	156,667037
0,025	0,3	3000	0,7750	0,7750	0,7750	0,77500	0,7635	0,7630	0,7630	0,76317	0,30057	0,00057	Polvo	Baja	185,526754
0,03	0,1	2000	0,7635	0,7630	0,7630	0,76317	0,7595	0,7595	0,7595	0,75950	0,09313	0,00687	Polvo	Media	121,795987
0,03	0,1	2500	0,7595	0,7595	0,7595	0,75950	0,7535	0,7535	0,7530	0,75333	0,15663	0,05663	Polvo	Media	151,513516
0,03	0,1	3000	0,7535	0,7535	0,7530	0,75333	0,7500	0,7505	0,7510	0,75050	0,07197	0,02803	Polvo	Media	180,339985
0,03	0,2	2000	0,7500	0,7505	0,7510	0,75050	0,7415	0,7420	0,7410	0,74150	0,22860	0,02860	Polvo	Media	119,774477
0,03	0,2	2500	0,7415	0,7420	0,7410	0,74150	0,7360	0,7360	0,7360	0,73600	0,13970	0,06030	Polvo	Media	147,922675
0,03	0,2	3000	0,7360	0,7360	0,7360	0,73600	0,7265	0,7260	0,7260	0,72617	0,24977	0,04977	Polvo	Media	176,190569
0,03	0,3	2000	0,7265	0,7260	0,7265	0,72633	0,7160	0,7160	0,7160	0,71600	0,26247	0,03753	Polvo	Media	115,917648
0,03	0,3	2500	0,7160	0,7160	0,7160	0,71600	0,7040	0,7040	0,7040	0,70400	0,30480	0,00480	Polvo	Media	142,835652
0,03	0,3	3000	0,7040	0,7040	0,7040	0,70400	0,6925	0,6925	0,6925	0,69250	0,29210	0,00790	Polvo	Media	168,53011
0,035	0,1	2000	0,6925	0,6925	0,6925	0,69250	0,6885	0,6890	0,6885	0,68867	0,09737	0,00263	Polvo	Alta	110,518088
0,035	0,1	2500	0,6885	0,6890	0,6885	0,68867	0,6820	0,6830	0,6835	0,68283	0,14817	0,04817	Polvo	Alta	137,382894
0,035	0,1	3000	0,6820	0,6830	0,6835	0,68283	0,6765	0,6760	0,6765	0,67633	0,16510	0,06510	Polvo	Alta	163,463035
0,035	0,2	2000	0,6765	0,6760	0,6765	0,67633	0,6685	0,6675	0,6680	0,66800	0,21167	0,01167	Polvo	Alta	107,938003
0,035	0,2	2500	0,6685	0,6675	0,6680	0,66800	0,6600	0,6600	0,6600	0,66017	0,19897	0,00103	Polvo	Alta	133,260077
0,035	0,2	3000	0,6600	0,6600	0,6605	0,66017	0,6535	0,6535	0,6530	0,65333	0,17357	0,02643	Polvo	Alta	158,036876
0,035	0,3	2000	0,6535	0,6535	0,6530	0,65333	0,6415	0,6425	0,6420	0,64200	0,28787	0,01213	Polvo	Alta	104,267366
0,035	0,3	2500	0,6415	0,6425	0,6420	0,64200	0,6295	0,6295	0,6295	0,62950	0,31750	0,01750	Polvo	Alta	128,073308
0,035	0,3	3000	0,6295	0,6295	0,6295	0,62950	0,6175	0,6180	0,6175	0,61767	0,30057	0,00057	Polvo	Alta	150,695602

Tabla 15: Pruebas de acabado de acero.

ACABADO - ACERO SAE 12L14															
FACTORES			DIAMETRO												
AVANCE (mm/rev)	PROF. CORTE (mm)	VEL. HUSILLO (rpm)	INICIAL (in)			PROM. INICIAL (in)	FINAL (in)			PROM. FINAL (in)	DIFERENCIA (mm)	ERROR ABSOLUTO	VIRUTA	CALIDAD	VELOCIDAD DE CORTE
0,025	0,1	2000	0,9785	0,9785	0,9785	0,97850	0,9720	0,9720	0,9725	0,97217	0,16087	0,06087	Pequeña	Alta	156,161659
0,025	0,1	2500	0,9720	0,9720	0,9725	0,97217	0,9680	0,9685	0,9680	0,96817	0,10160	0,00160	Pequeña	Media	193,93863
0,025	0,1	3000	0,9680	0,9685	0,9680	0,96817	0,9630	0,9635	0,9630	0,96317	0,12700	0,02700	Pequeña	Baja	231,768799
0,025	0,2	2000	0,9630	0,9635	0,9630	0,96317	0,9520	0,9525	0,9525	0,95233	0,27517	0,07517	Pequeña	Baja	153,714568
0,025	0,2	2500	0,9520	0,9525	0,9525	0,95233	0,9415	0,9420	0,9415	0,94167	0,27093	0,07093	Pequeña	Media	189,982056
0,025	0,2	3000	0,9415	0,9420	0,9415	0,94167	0,9330	0,9325	0,9330	0,93283	0,22437	0,02437	Pequeña	Baja	225,424981
0,025	0,3	2000	0,9330	0,9325	0,9330	0,93283	0,9215	0,9215	0,9215	0,92150	0,28787	0,01213	Pequeña	Media	148,873583
0,025	0,3	2500	0,9215	0,9215	0,9215	0,92150	0,9095	0,9100	0,9100	0,90983	0,29633	0,00367	Pequeña	Media	183,83108
0,025	0,3	3000	0,9095	0,9100	0,9100	0,90983	0,8980	0,8980	0,8980	0,89800	0,30057	0,00057	Pequeña	Alta	217,80442
0,03	0,1	2000	0,8980	0,8980	0,8980	0,89800	0,8940	0,8940	0,8940	0,89400	0,10160	0,00160	Pequeña	Media	143,31443
0,03	0,1	2500	0,8940	0,8940	0,8940	0,89400	0,8905	0,8900	0,8900	0,89017	0,09737	0,00263	Pequeña	Alta	178,345073
0,03	0,1	3000	0,8905	0,8900	0,8900	0,89017	0,8835	0,8835	0,8840	0,88367	0,16510	0,06510	Pequeña	Baja	213,096429
0,03	0,2	2000	0,8835	0,8835	0,8840	0,88367	0,8785	0,8785	0,88022	0,87907	0,11665	0,08335	Pequeña	Baja	141,026932
0,03	0,2	2500	0,8785	0,8785	0,8785	0,87850	0,8710	0,8705	0,8705	0,87067	0,19897	0,00103	Pequeña	Media	175,252961
0,03	0,2	3000	0,8710	0,8705	0,8705	0,87067	0,8625	0,8630	0,8625	0,86267	0,20320	0,00320	Pequeña	Media	208,428336
0,03	0,3	2000	0,8625	0,8630	0,8625	0,86267	0,8510	0,8520	0,8525	0,85183	0,27517	0,02483	Pequeña	Alta	137,675481
0,03	0,3	2500	0,8510	0,8520	0,8525	0,85183	0,8390	0,8390	0,8390	0,83900	0,32597	0,02597	Pequeña	Alta	169,933197
0,03	0,3	3000	0,8390	0,8390	0,8390	0,83900	0,8275	0,8270	0,8270	0,82717	0,30057	0,00057	Pequeña	Alta	200,847673
0,035	0,1	2000	0,8270	0,8275	0,8270	0,82717	0,8230	0,8225	0,8210	0,82217	0,12700	0,02700	Pequeña	Alta	132,009933
0,035	0,1	2500	0,8230	0,8225	0,8210	0,82217	0,8185	0,8180	0,8180	0,81817	0,10160	0,00160	Pequeña	Alta	164,01496
0,035	0,1	3000	0,8185	0,8180	0,8180	0,81817	0,8130	0,8130	0,8125	0,81283	0,13547	0,03547	Pequeña	Media	195,860395
0,035	0,2	2000	0,8075	0,8075	0,8075	0,80750	0,8000	0,8000	0,8000	0,80000	0,19050	0,00950	Pequeña	Media	128,871272
0,035	0,2	2500	0,8000	0,8000	0,8000	0,80000	0,7920	0,7920	0,7920	0,79200	0,20320	0,00320	Pequeña	Media	159,592907
0,035	0,2	3000	0,7920	0,7920	0,7915	0,79183	0,7825	0,7820	0,7820	0,78217	0,24553	0,04553	Pequeña	Alta	189,556475
0,035	0,3	2000	0,7825	0,7820	0,7820	0,78217	0,7720	0,7720	0,7720	0,77200	0,25823	0,04177	Pequeña	Alta	124,828252
0,035	0,3	2500	0,7720	0,7720	0,7720	0,77200	0,7605	0,7600	0,7600	0,76017	0,30057	0,00057	Pequeña	Alta	154,007155
0,035	0,3	3000	0,7605	0,7600	0,7600	0,76017	0,7485	0,7485	0,7485	0,74850	0,29633	0,00367	Pequeña	Alta	181,975812

La Tabla 13 muestra los resultados de las 27 pruebas que se realizaron para el proceso de acabado de aluminio. En éste experimento se determinó, en primera medida, el error experimental para conocer si el proceso se encuentra dentro de los parámetros de tolerancia preestablecidos por la industria. El valor máximo que se obtuvo en las pruebas fue de 0.086mm, lo que indica que el proceso de mecanizado se encuentra en el intervalo de aceptación¹⁰.

Por otra parte, la viruta que se obtuvo en todas las pruebas de mecanizado fue continua y corta. Los experimentos de acabado en aluminio no presentaron deformación en la superficie debido al arranque de viruta, puesto que el proceso es más lento y no se dan las condiciones para que esto suceda.

La característica que se tomó para el análisis superficial fue la homogeneidad en la superficie dada por una continuidad en los cortes que deja la herramienta al mecanizar la pieza. Se determinaron 11 piezas con calidad Alta, 10 con calidad Media y 6 con calidad Baja; los rangos se establecieron con ayuda del Experto2 con base en el grado de homogeneidad que se presenta en cada una de las piezas.

La última columna muestra la velocidad de corte determinada para cada una de las pruebas. El valor máximo que se obtuvo fue de 274.3m/min para la calidad Alta.

La Tabla 14 muestra los resultados de las pruebas de mecanizado realizadas en bronce. Al igual que en las pruebas de desbaste, se obtuvo únicamente la viruta fragmentada con todas las combinaciones de factores que se realizó. El error máximo que se alcanzó con respecto a la profundidad teórica fue de aproximadamente 0.07mm; ninguna de las pruebas en los tres materiales superó la décima.

La calidad superficial del acabado de bronce fue la más difícil de determinar, puesto que no se observa a simple vista los problemas de homogeneidad que presenta el material. La distribución de las superficies entre Alta, Media y Baja fue realizada con ayuda del Experto2, según el grado de homogeneidad que presentó la superficie de cada pieza. Al igual que en el aluminio y acero, se contempló la continuidad en la marca de líneas que deja la herramienta cuando realiza el proceso de mecanizado.

La velocidad máxima de corte que se alcanzó en el mecanizado de bronce cuando se determinó una superficie de calidad Alta fue de 163.46m/min y se obtuvo con un avance de 0.035mm/rev, una profundidad de 0.1mm y una velocidad del husillo de 3.000rpm.

La Tabla 15 muestra los resultados obtenidos de las 27 pruebas de acabado que se realizaron con el acero. Se halló la diferencia entre el diámetro inicial y el diámetro final para obtener el error absoluto experimental y comprobar que los procesos estuviesen

¹⁰ Tolerancia aceptada comercialmente para el proceso de acabado: 0.05 a 0.13 (\pm mm) en máquinas de control numérico. S. Kalpakjian, Manufactura, ingeniería y tecnología, Pearson Educación, 4ta Edición.

dentro de las tolerancias aceptadas en la industria; el error máximo que se presentó fue de 0.083mm lo cual es admitido. Por otra parte, el valor mínimo fue de 0.00057mm lo que indica que la máquina logra tolerancias por debajo de las milésimas.

La viruta resultante, en todos los casos, fue pequeña y en espiral; esto beneficia el proceso de mecanizado debido a que no se enreda con la pieza y no la raya.

La categorización de la calidad superficial se dio con base en el grado de homogeneidad que tuvo cada pieza después del proceso de mecanizado. Aunque el acero no presentó buenas características superficiales para éste proceso debido a las grandes variaciones que surgieron de los mecanizados, las superficies se determinaron con las mismas características que el aluminio y bronce, pero, con un mayor grado de amplitud. Se tuvo como calidad Alta las piezas que tenían el mínimo de variaciones a lo largo de la superficie, como calidad Baja un rango alto de variaciones en el acabado y los valores medios se encuentran en el tercer tipo de calidad (Media).

La sección 10.2 muestra con mayor detenimiento la diferencia entre la categorización de cada uno de los materiales en el proceso de acabado.

10. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS CATEGORIZACIÓN DE MATERIALES

10.1 CATEGORIZACIÓN DESBASTE

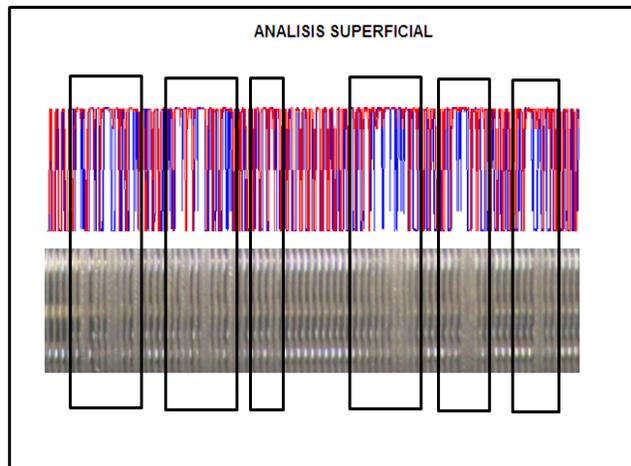
Los resultados que se muestran a continuación ejemplifican la categorización de las superficies con base en el procesamiento de imágenes que se realizó en Matlab® para el proceso de desbaste. Los dos puntos seleccionados de la imagen se encontraban dentro de un rango en el cual la fotografía no presentaba brillo a lo largo de toda la fila, debido a que esto afecta el procesamiento de la imagen puesto que no se obtienen los grises necesarios para efectuar la superposición de las líneas(Figura 9).

Figura 9. Selección de líneas.



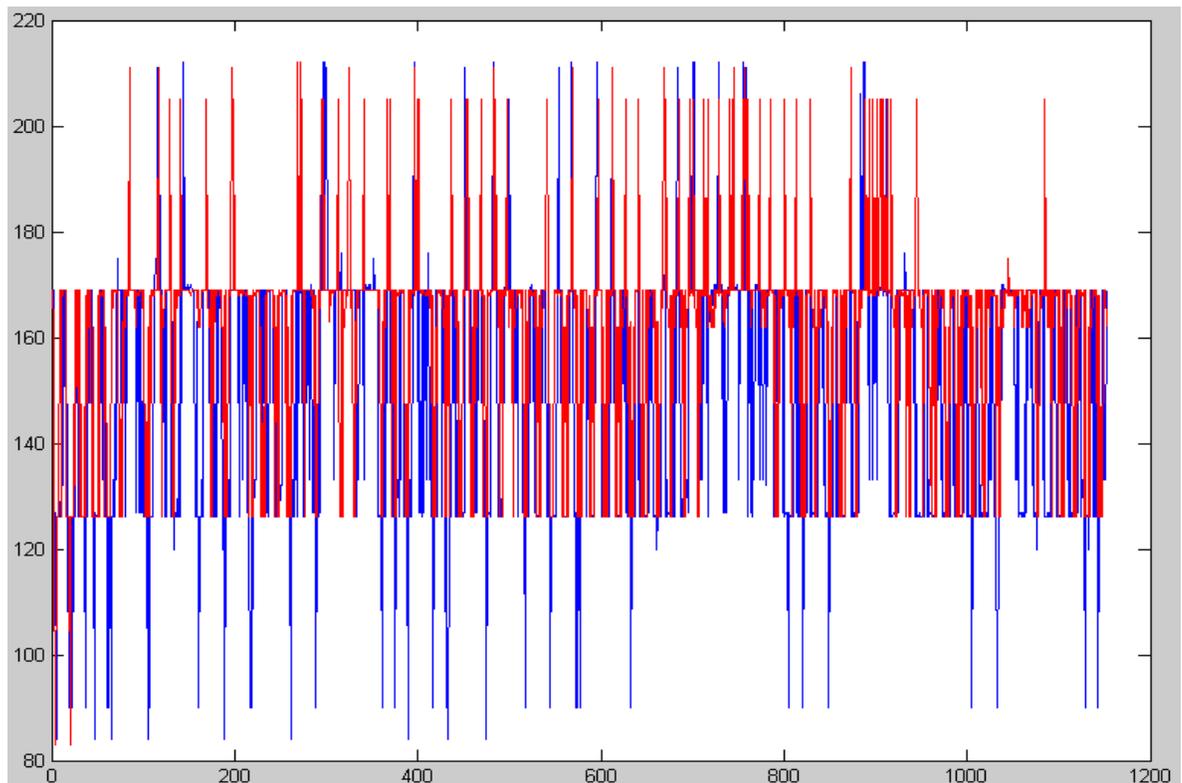
La Figura 10. Muestra los vacíos creados en la imagen procesada cuando se tiene un problema superficial. Se realiza una categorización superficial cualitativa con base en los resultados.

Figura 10. Análisis de Superficies.



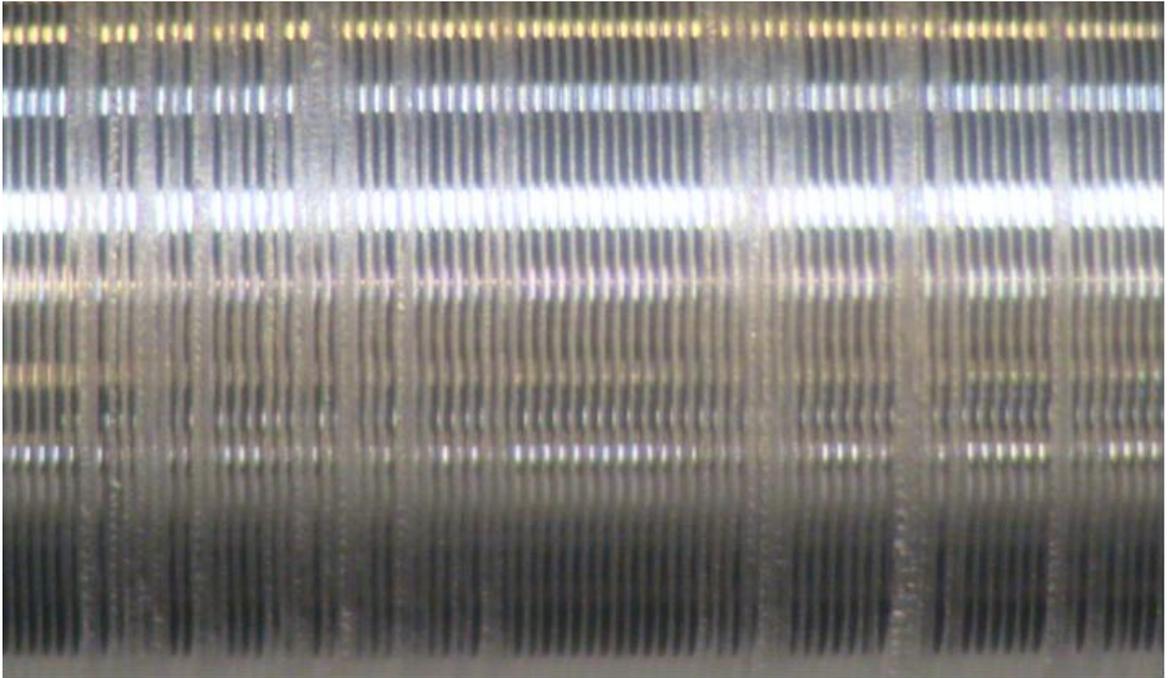
La Gráfica 1 muestra la superposición de las líneas roja y azul, procesadas de la Imagen9 la cual es tomada de una pieza de aluminio que resultó con grandes defectos en la superficie luego de ser mecanizada; fue catalogada de calidad “Baja”. En la Gráfica 1 se ven los vacíos que rompen la uniformidad y la superposición de las líneas cuando se da una alteración en la superficie analizada. Los vacíos se repiten a lo largo de la gráfica y son altamente notables debido a la amplitud de estos.

Gráfica 1: Imagen procesada de aluminio de calidad “Baja”*. En desbaste.



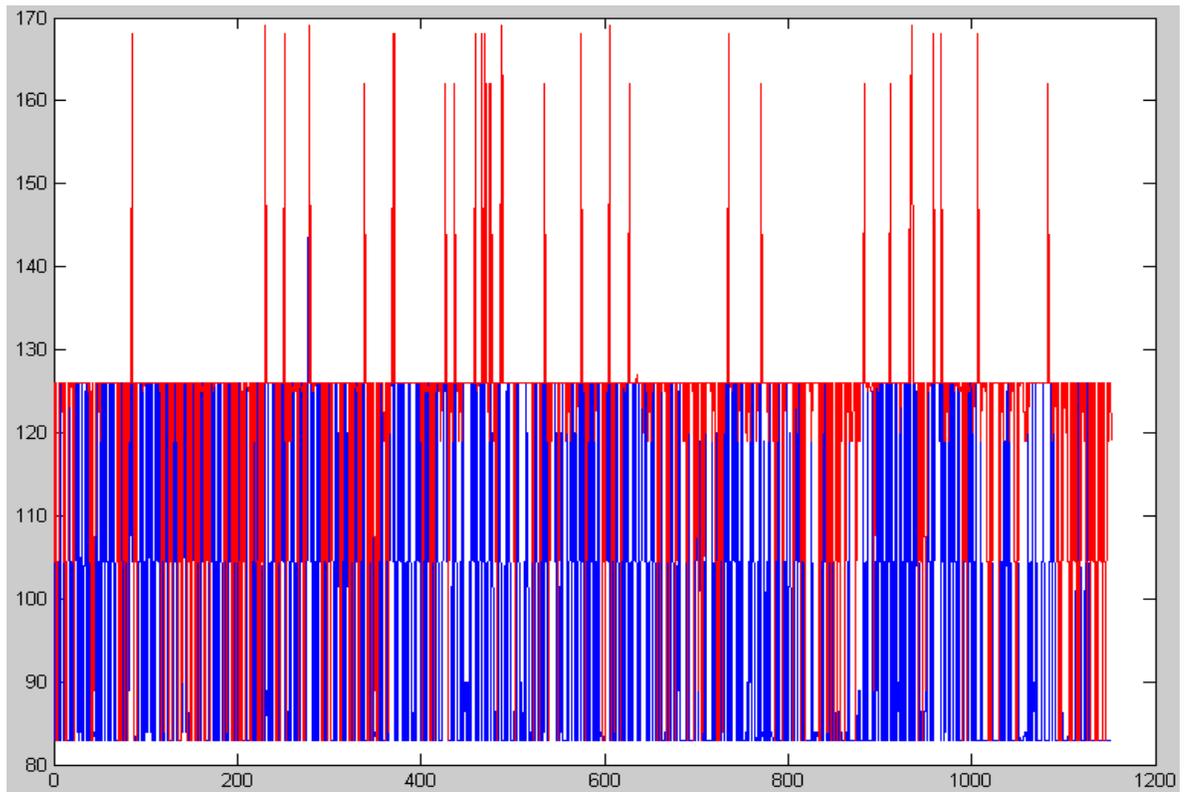
*Las coordenadas que tienen tanto el eje horizontal como el vertical se dan en píxeles.

Imagen 9. Aluminio de calidad “Baja”. En desbaste.



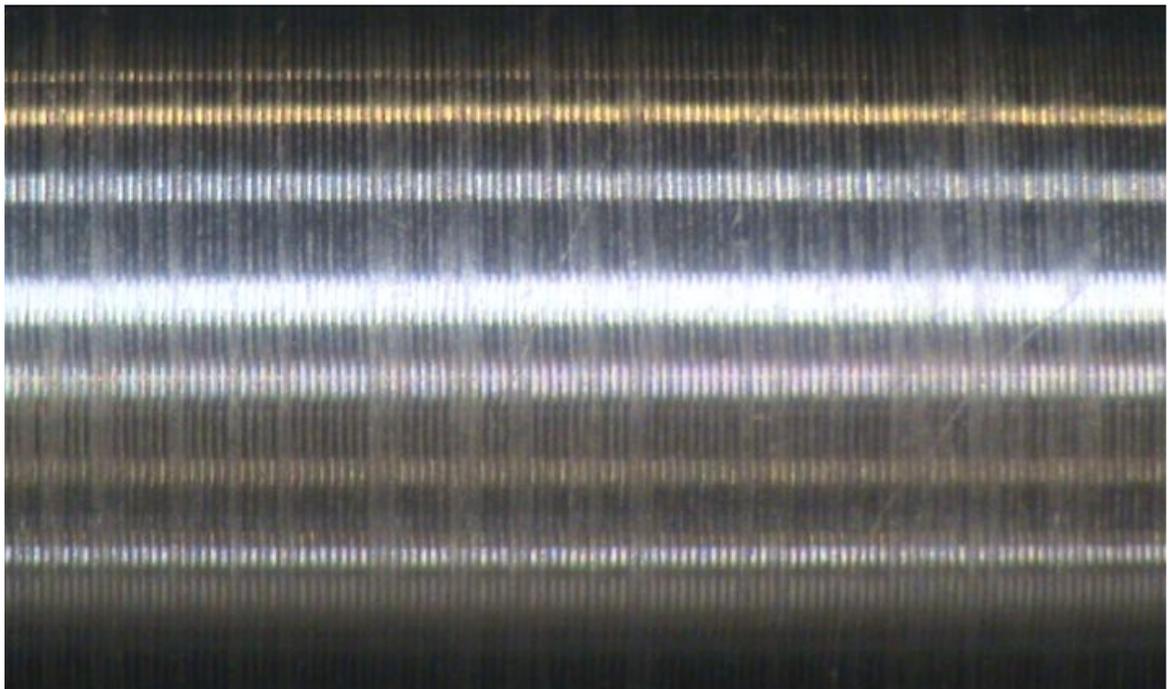
La Gráfica 2 muestra el procesamiento de la Imagen 10, la cual fue catalogada de calidad “Media”. En ésta gráfica se aprecian pequeños vacíos y cambios en la uniformidad de la superposición de las líneas que hacen que la pieza de aluminio esté catalogada dentro de este rango. A diferencia de la Gráfica 1 ésta no tiene imperfecciones en la superficie tan visibles y amplias que muestren grandes espacios entre las líneas.

Gráfica 2: Imagen procesada de aluminio de calidad "Media"*. En desbaste.



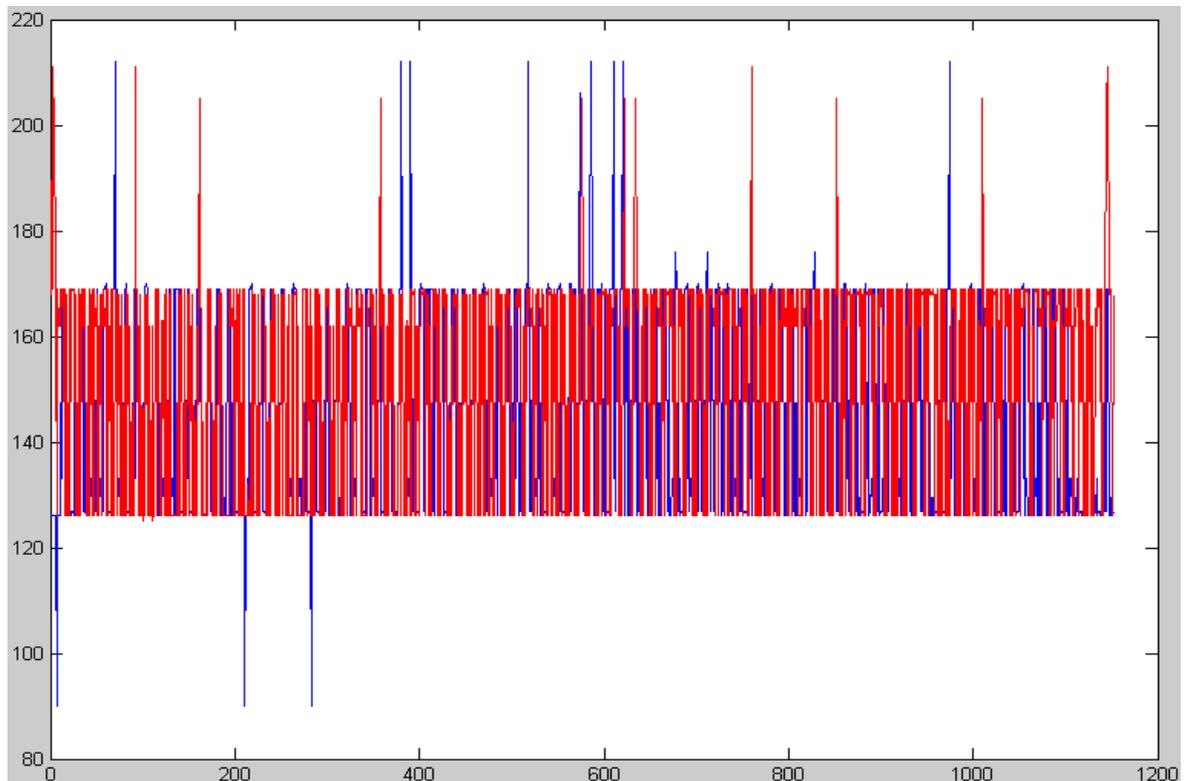
*Las coordenadas que tienen tanto el eje horizontal como el vertical se dan en pixeles.

Imagen 10: Aluminio de calidad "Media". En desbaste.



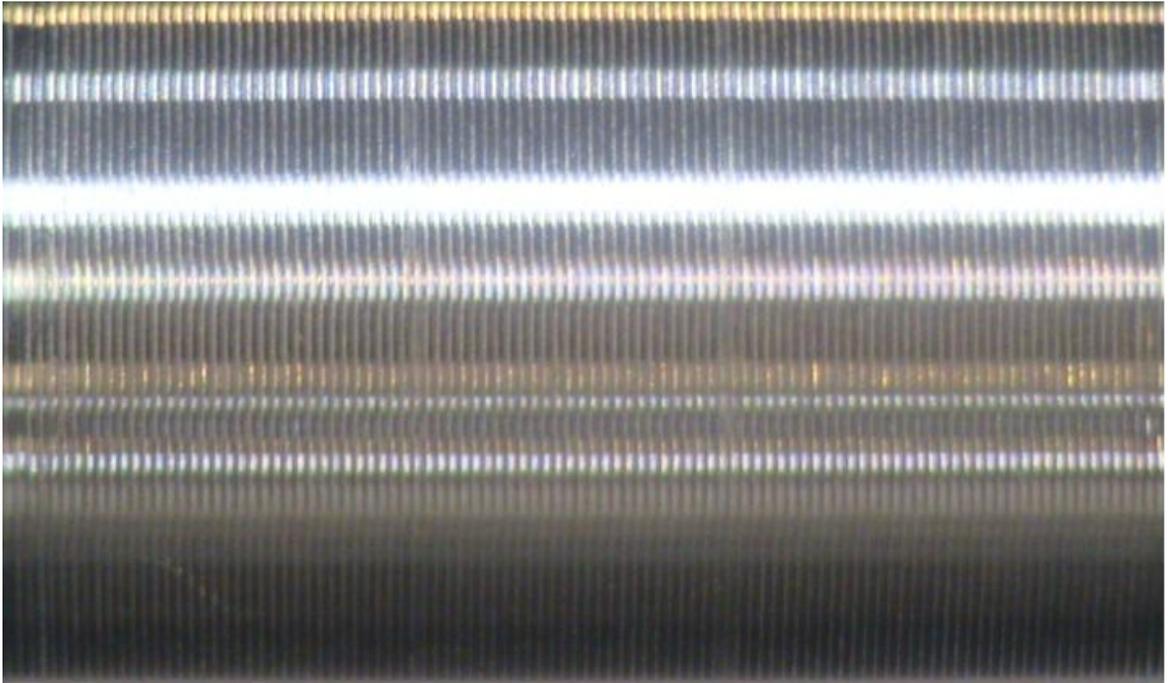
La Gráfica 3 muestra la imagen procesada de una fotografía de aluminio (Imagen 11) que fue catalogada de calidad “Alta”. En la gráfica se puede observar una homogeneidad en la superposición de las líneas, roja y azul, las cuales presentan un mínimo de vacíos a lo largo de la imagen, es decir, los pixeles de las columnas que son representados por los colores tienen características similares a lo largo de las dos filas seleccionada en diferentes puntos de la pieza.

Gráfica 3: Imagen procesada de aluminio de calidad “Alta”*. En desbaste.



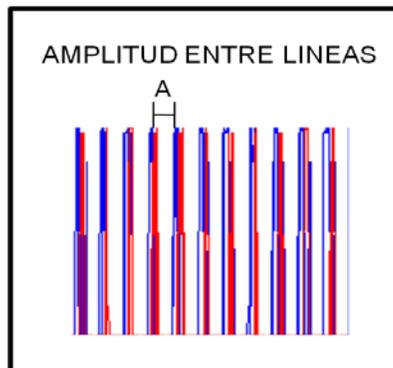
*Las coordenadas que tienen tanto el eje horizontal como el vertical se dan en píxeles.

Imagen 11: Aluminio de calidad "Alta". En desbaste.



Los análisis que se hacen para el acero y bronce en el proceso de desbaste se basan en la amplitud de las líneas.

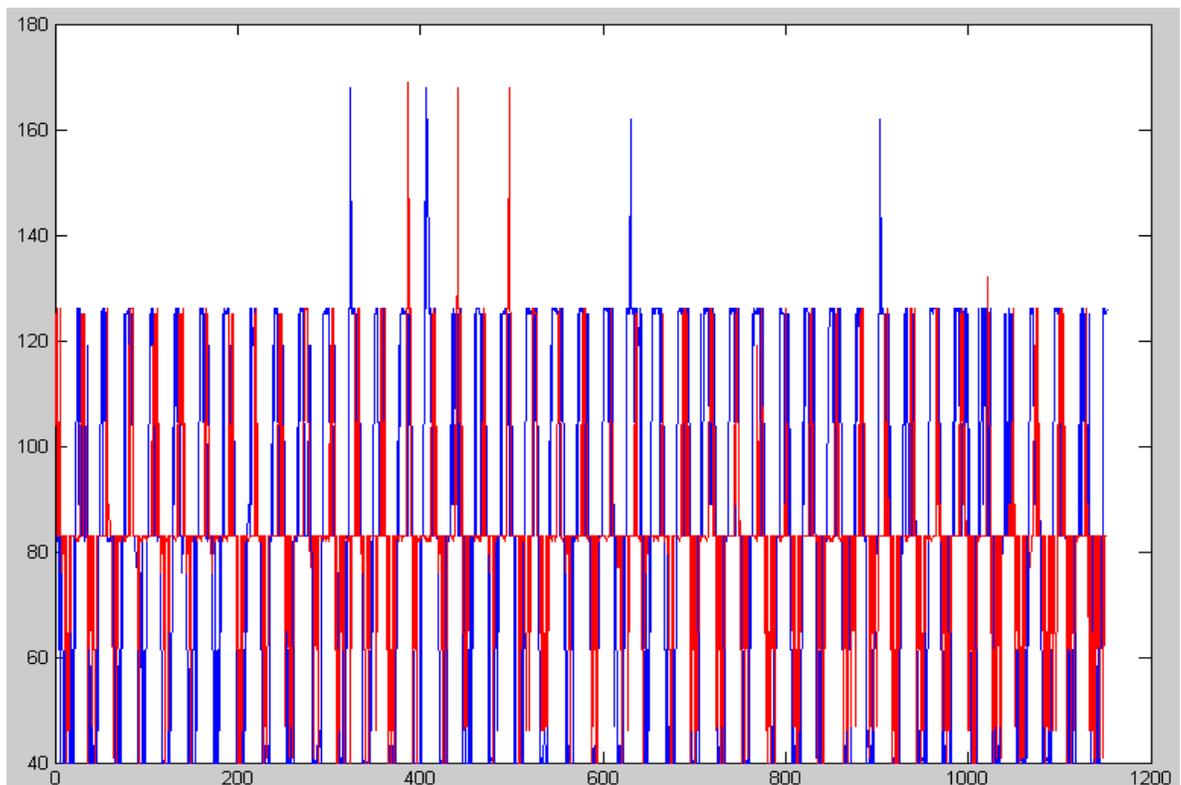
Figura 11: Amplitud de líneas



La Gráfica 4 muestra la imagen procesada de una fotografía de bronce la cual fue catalogada de calidad “Baja” debido a las condiciones resultantes del proceso de desbaste que por sus características no benefician el proceso de acabado.

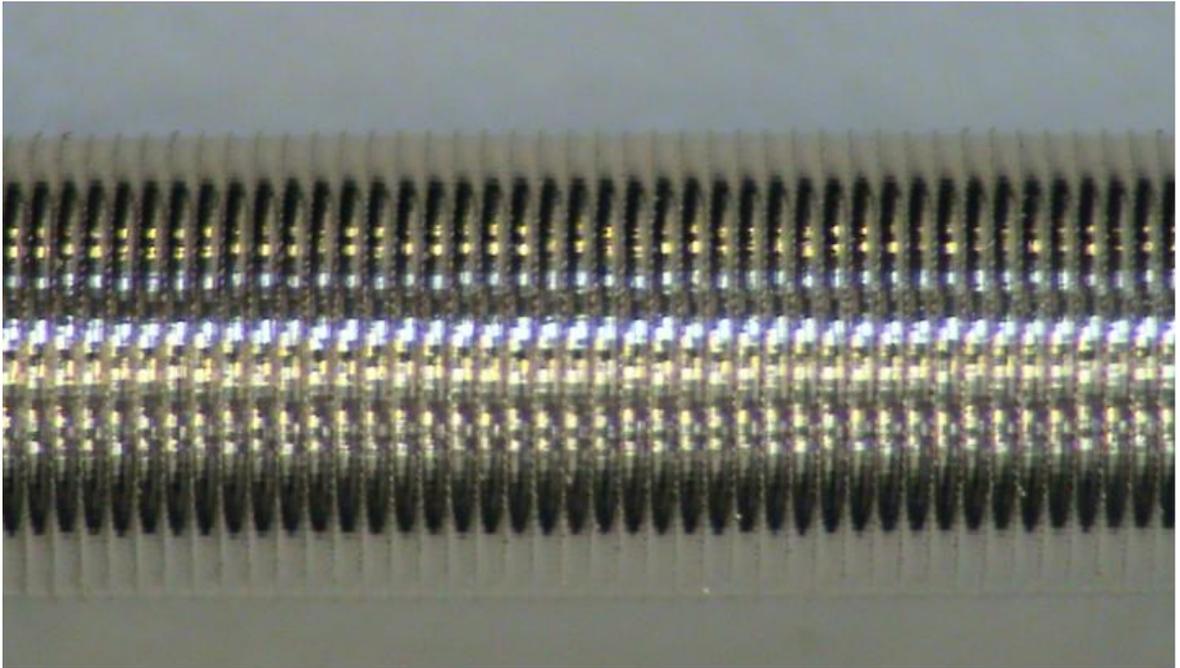
Las líneas muestran una continuidad en la superficie de la pieza con vacíos entre éstas, que no implica, como en el aluminio de calidad “Baja”, defectos creados en el proceso de corte. Como se mencionó anteriormente el mecanizado de acero y bronce, con los parámetros estudiados, no crea daños en la superficie del tipo del aluminio, por lo tanto, los vacíos que se observan en la Gráfica 4 son generados por las grandes depresiones que deja la herramienta cuando mecaniza éste tipo de material a grandes velocidades o avances. Esto hace a la superficie inadecuada para las características de desbaste que se estudian en éste experimento y se cataloga de calidad “Baja”.

Gráfica 4: Imagen procesada de bronce de calidad “Baja”*. En desbaste.



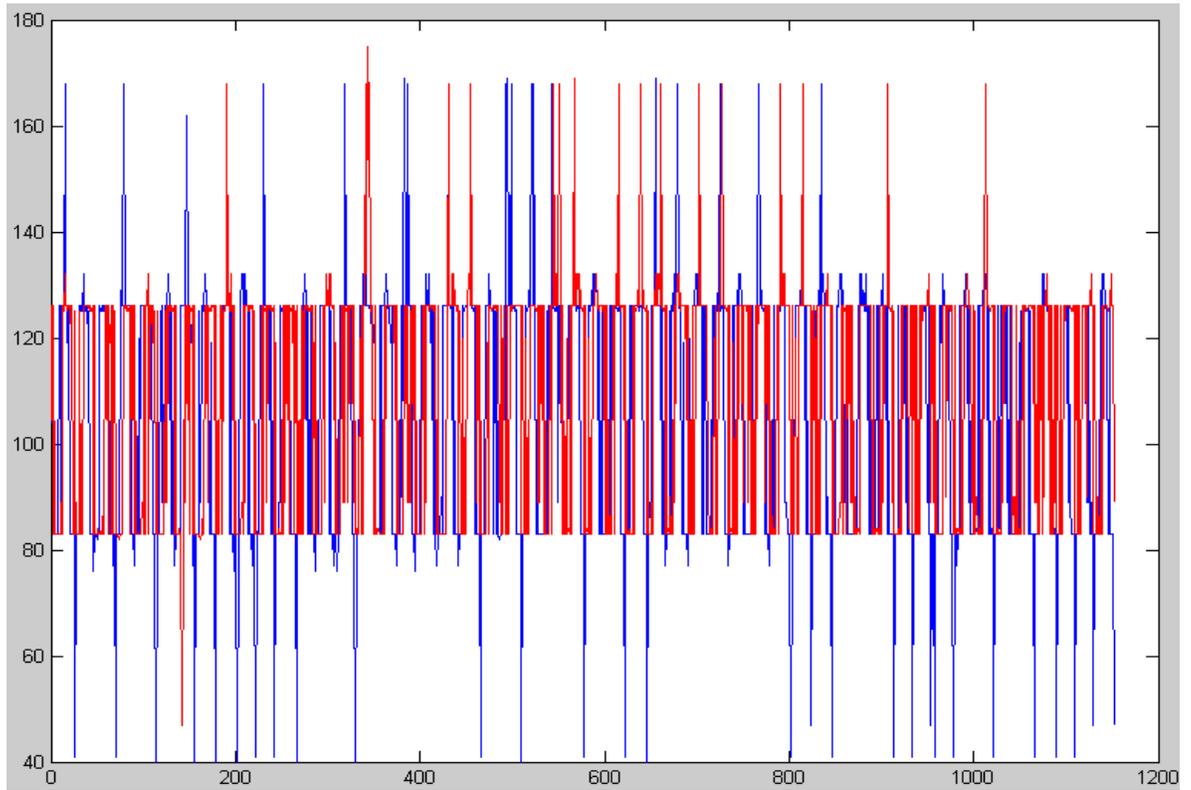
*Las coordenadas que tienen tanto el eje horizontal como el vertical se dan en píxeles.

Imagen 12: Bronce de calidad “Baja”. En desbaste.



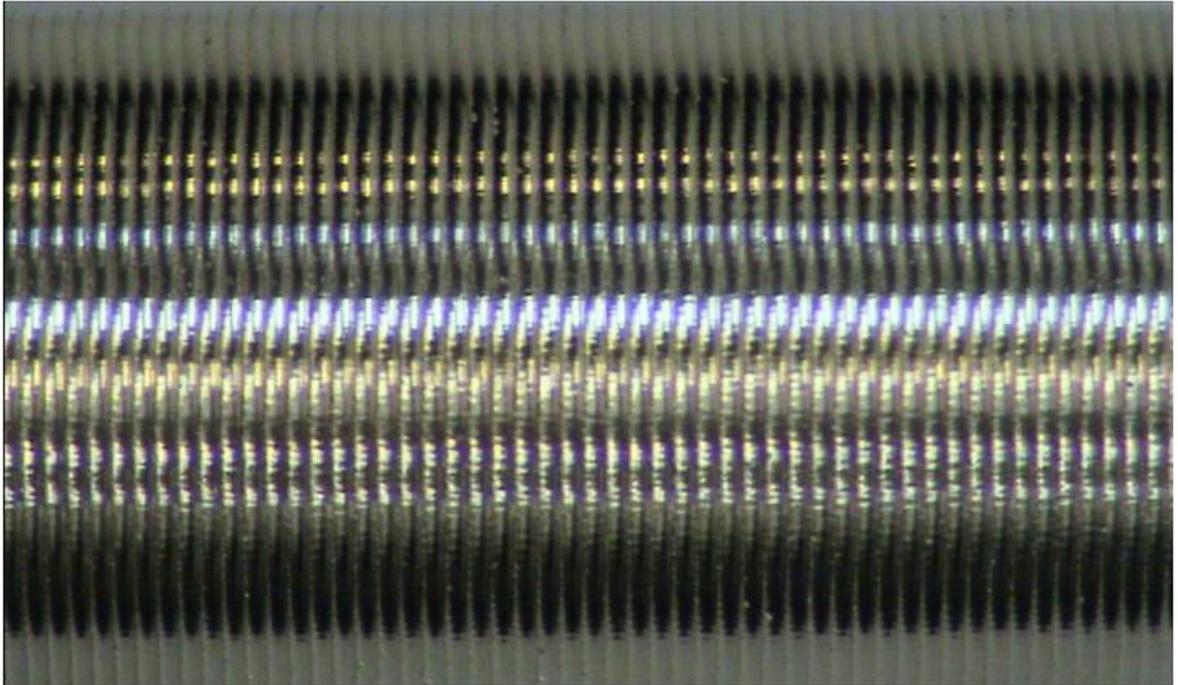
La Gráfica 5 muestra el procesamiento de una imagen de bronce catalogada de calidad “Media”. Se puede observar que las líneas superpuestas tienen una continuidad a lo largo de la imagen, y cuenta con vacíos entre éstas característico de las profundidades que deja el mecanizado de la herramienta en la superficie a determinados avances y velocidades. Estos tienen un menor rango de amplitud que los mostrados en la Gráfica4 por lo tanto se catalogan dentro de un nivel medio.

Gráfica 5: Imagen procesada de bronce de calidad "Media"*. En desbaste.



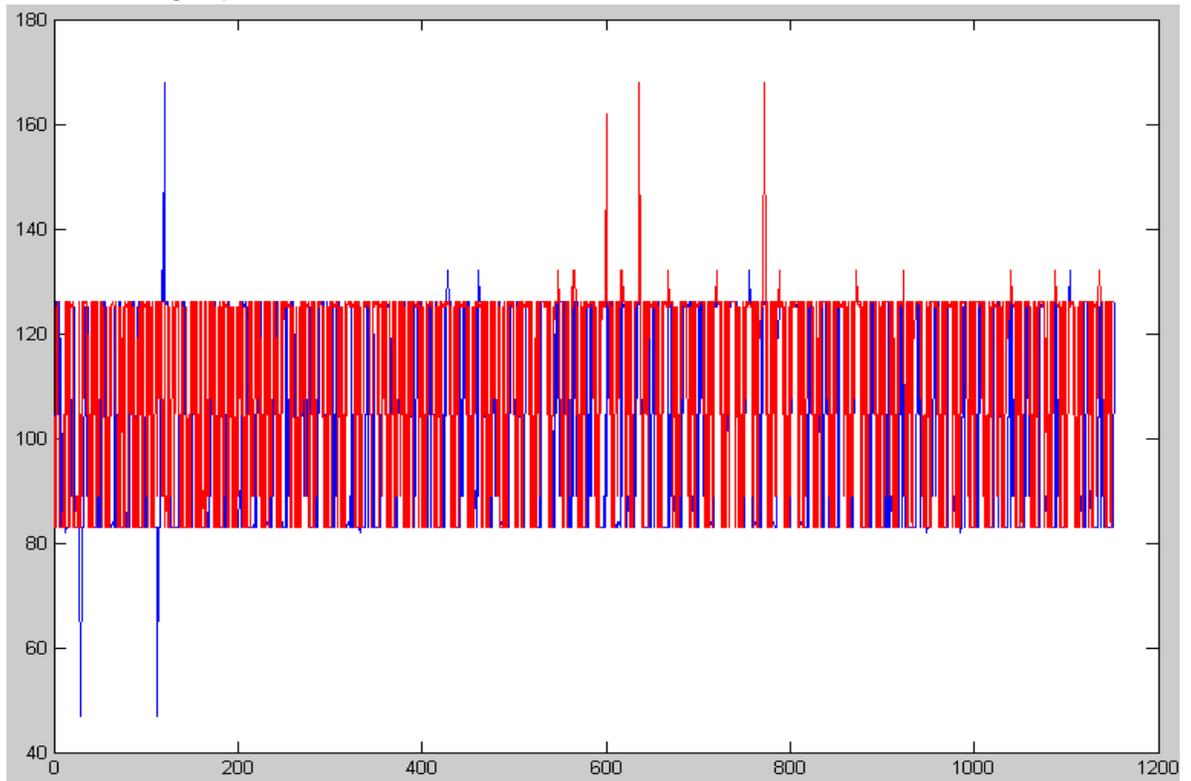
*Las coordenadas que tienen tanto el eje horizontal como el vertical se dan en pixeles.

Imagen 13: Bronce de calidad “Media”. En desbaste.



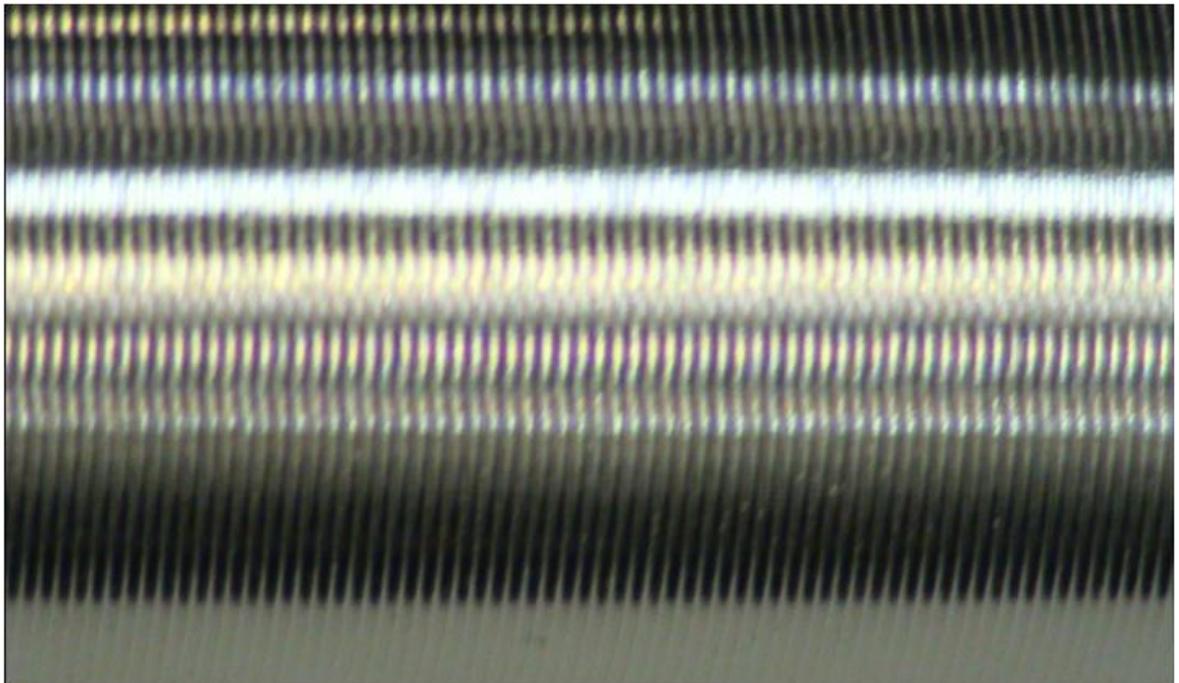
La Gráfica 6 muestra la superposición de líneas tomadas de una fotografía de bronce catalogado de calidad “Alta” que muestra una continuidad en las líneas y mínimos vacíos a lo largo de la imagen. Esta característica es la que se busca en las calidades altas de los tres materiales.

Gráfica 6: Imagen procesada de bronce de calidad "Alta"*. En desbaste.



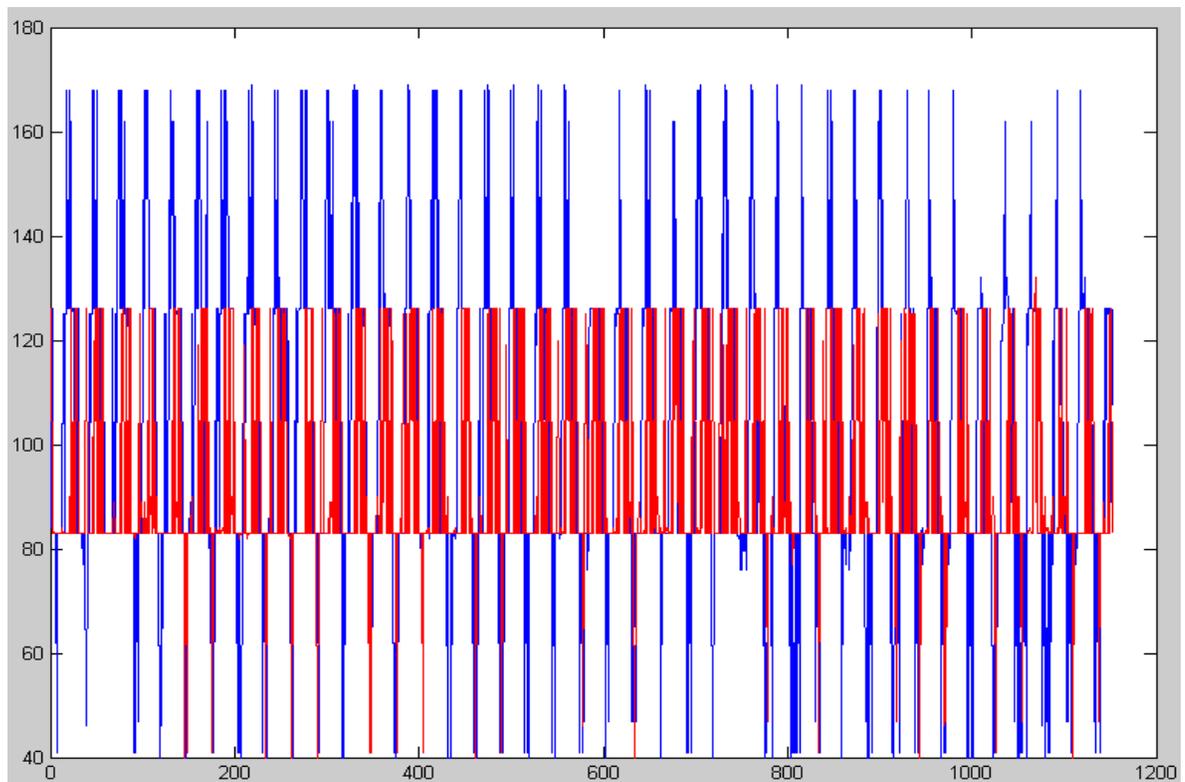
*Las coordenadas que tienen tanto el eje horizontal como el vertical se dan en pixeles.

Imagen 14: Bronce de calidad "Alta". En desbaste.



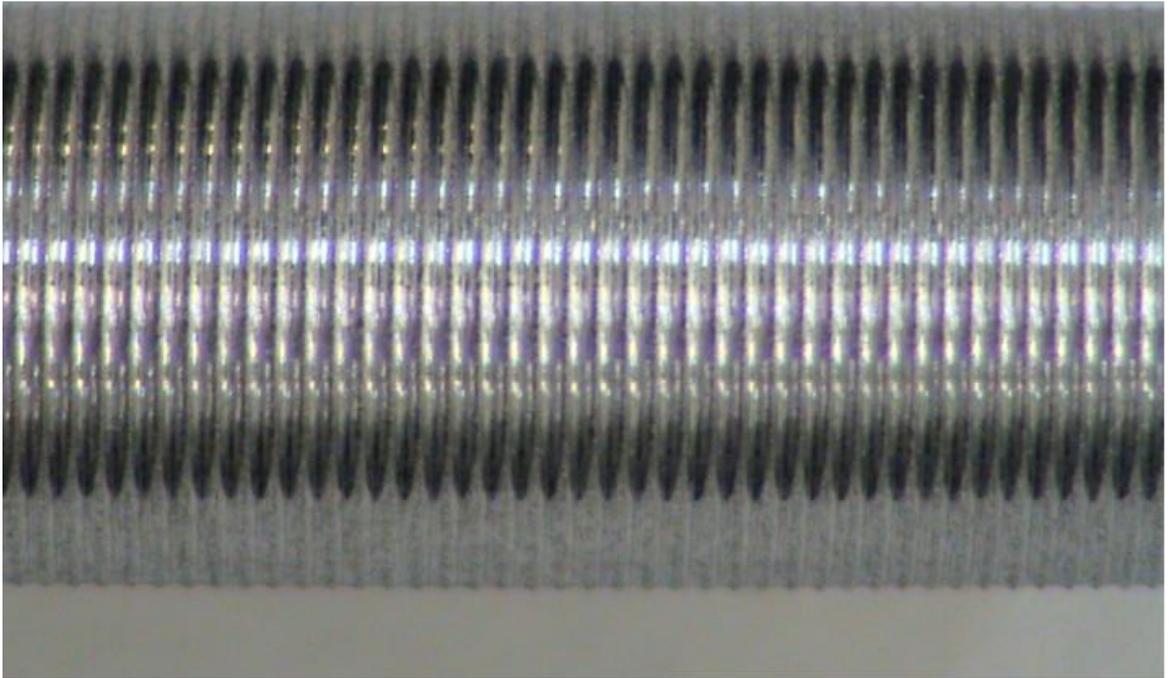
El acero cuenta con características de mecanizado similares a las de bronce, por lo tanto la catalogación de las superficies se desarrolló teniendo en cuenta el grado de separación entre las líneas superpuestas que se mencionó en el proceso de desbaste de bronce. Debido a esto una alta profundidad en la superficie, como se muestra en la Gráfica 7, es catalogada “Baja” porque afecta el proceso de acabado.

Gráfica 7: Imagen procesada de acero de calidad “Baja”*. En desbaste.



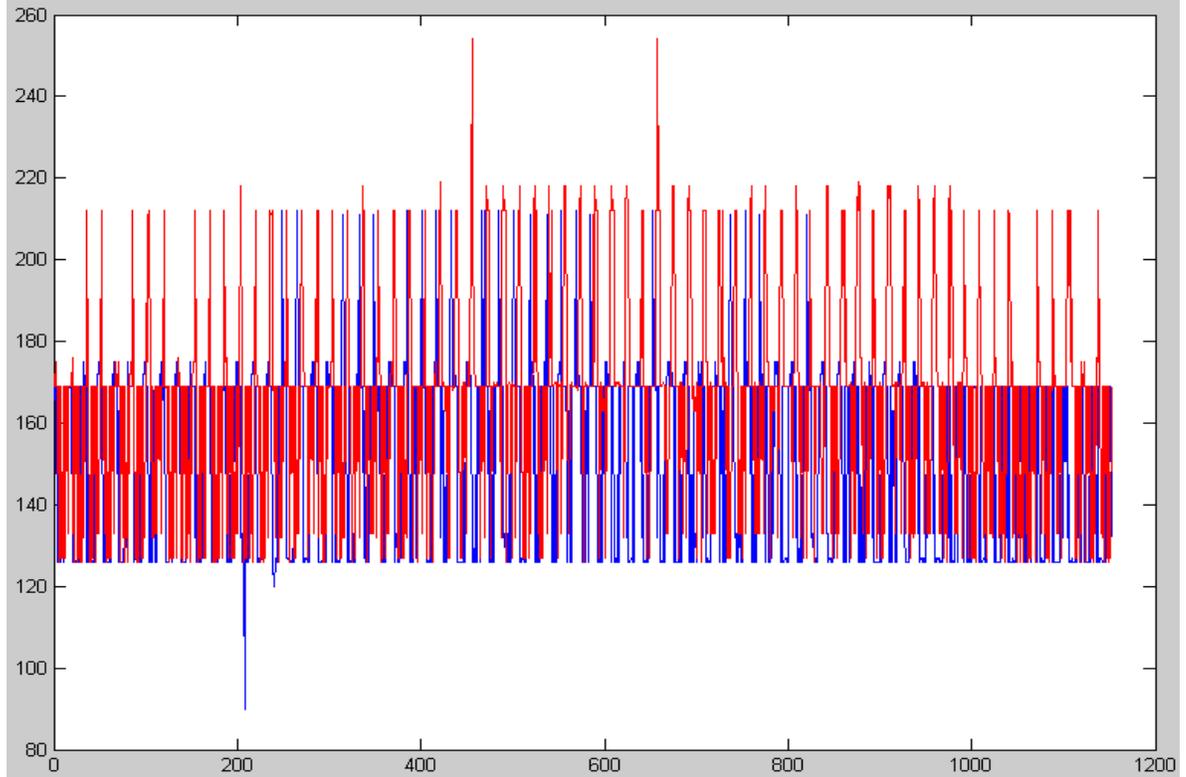
*Las coordenadas que tienen tanto el eje horizontal como el vertical se dan en píxeles.

Imagen 15: Acero de calidad "Baja". En desbaste.



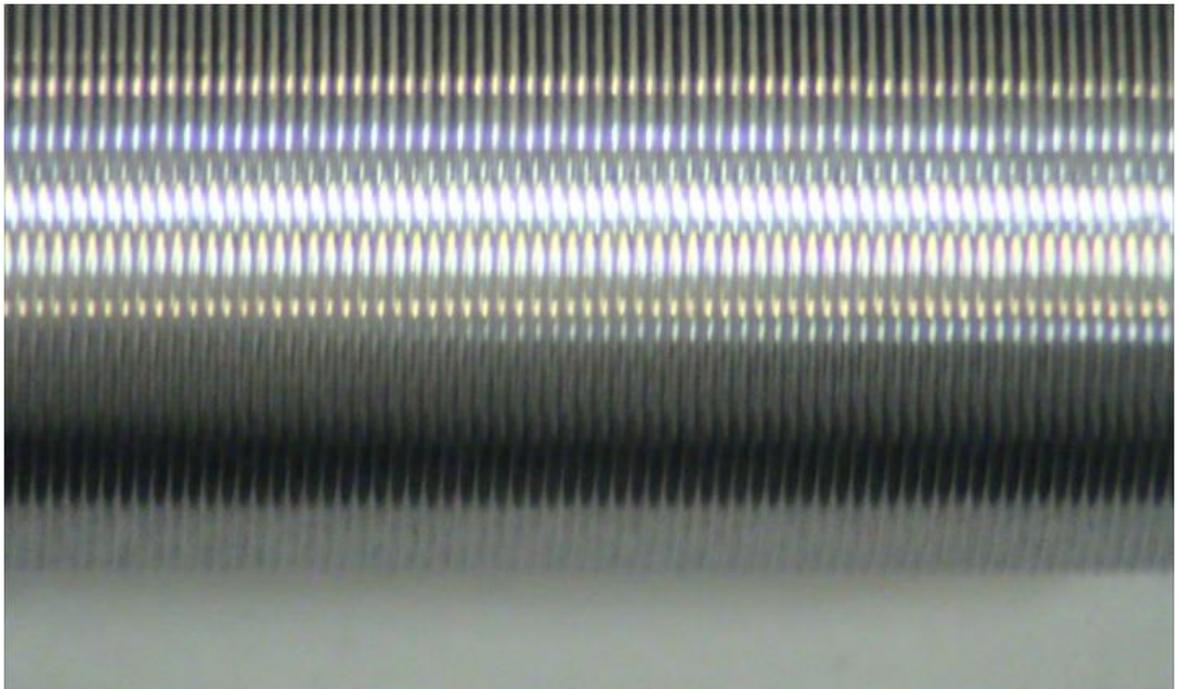
La Gráfica 8 muestra la imagen procesada de acero catalogada con una calidad "Media", como se puede observar en la superposición de líneas se encuentran vacíos propios de esta categoría puesto que no son tan amplios como los de calidad "Baja" pero son significativos para no considerarlos como calidad "Alta".

Gráfica 8: Imagen procesada de acero de calidad "Media"*. En desbaste.



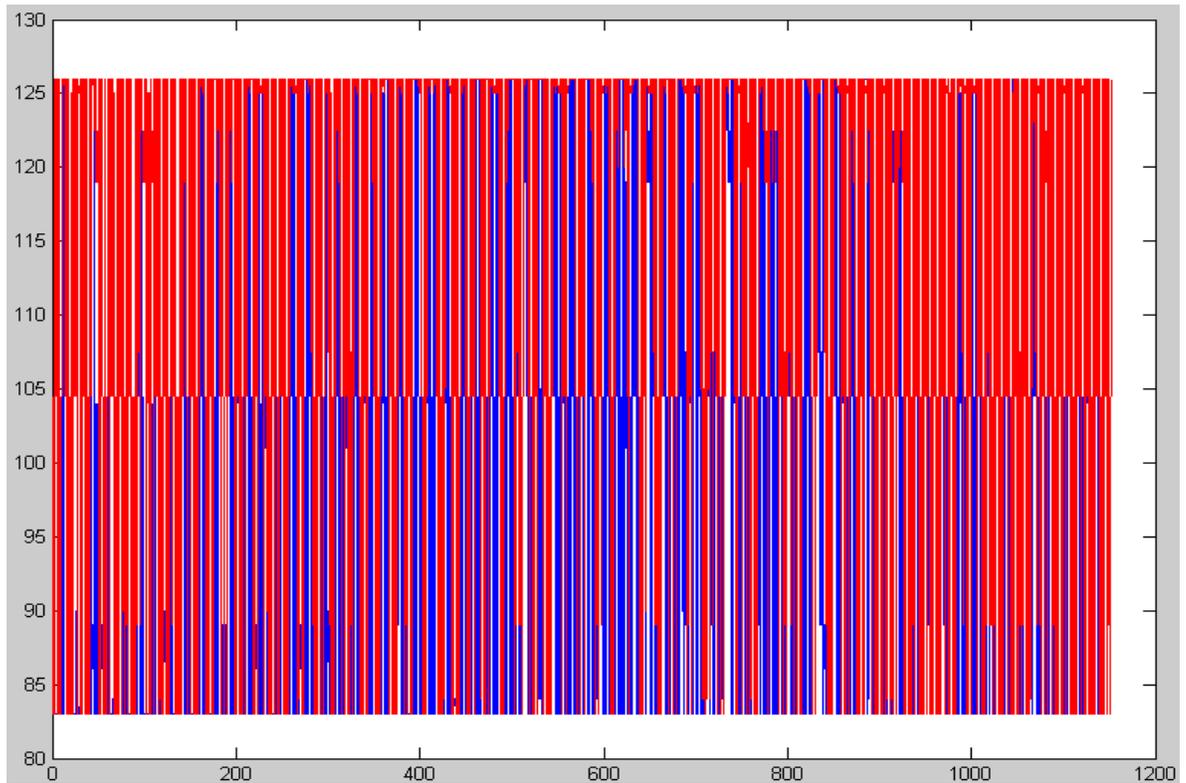
*Las coordenadas que tienen tanto el eje horizontal como el vertical se dan en píxeles.

Imagen 16: Acero de calidad "Media". En desbaste.



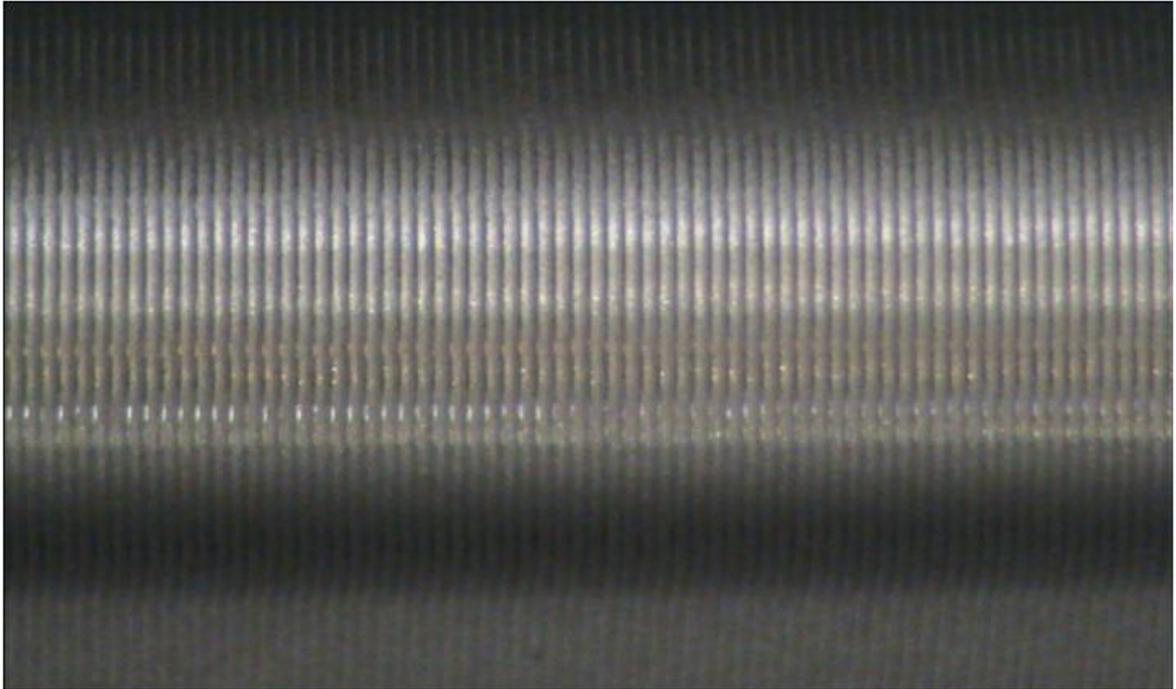
Finalmente, la Gráfica 9 muestra la imagen procesada de una fotografía de acero catalogado en el nivel de Alta calidad. Como se puede observar las líneas superpuestas muestran un mínimo de vacíos y tienen un comportamiento continuo.

Gráfica 9: Imagen procesada de acero de calidad "Alta"*. En desbaste.



*Las coordenadas que tienen tanto el eje horizontal como el vertical se dan en píxeles.

Imagen 17: Acero de calidad "Alta". En desbaste.



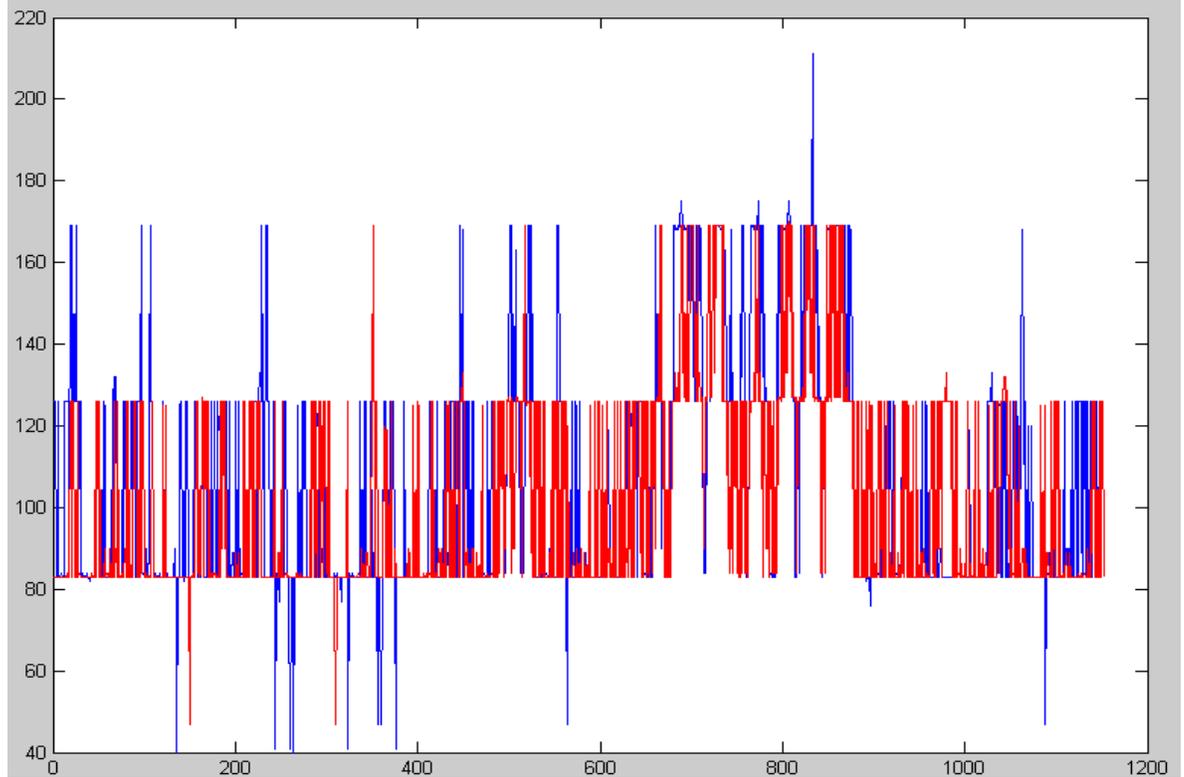
10.2 CATEGORIZACIÓN ACABADO

Los resultados que se muestran a continuación indican el procesamiento de imágenes realizado en la herramienta de computación Matlab®, para la caracterización de las superficies obtenidas en el experimento de 3 factores con 3 niveles para el proceso de acabado. Al igual que en el desbaste se tomaron dos puntos de la imagen en los cuales no hay brillo en pieza pues esto afecta el procesamiento de los datos (Figura 9).

La primera evaluación que se llevo a cabo fue en el aluminio, se escogió una imagen de una pieza con baja calidad en el acabado para analizar la calidad superficial. La Gráfica10 muestra los resultados obtenidos en donde se ve claramente el vacío que se encuentra en la continuidad de las líneas cuando ocurre un cambio en la homogeneidad de la superficie.

La Imagen 18 muestra el defecto que se produce en la superficie, debido a la herramienta y a la viruta que se produce en el mecanizado. Los rayones que deja la viruta no se puede controlar debido a que no se cuenta con el mecanismo necesario para evitar que la viruta, que es de tipo continua, se enrede con la pieza y cause este tipo de problemas.

Gráfica 10: Imagen procesada de aluminio de calidad "Baja"*. En acabado.



*Las coordenadas que tienen tanto el eje horizontal como el vertical se dan en píxeles.

Imagen 18: Aluminio de calidad "Baja". En acabado.

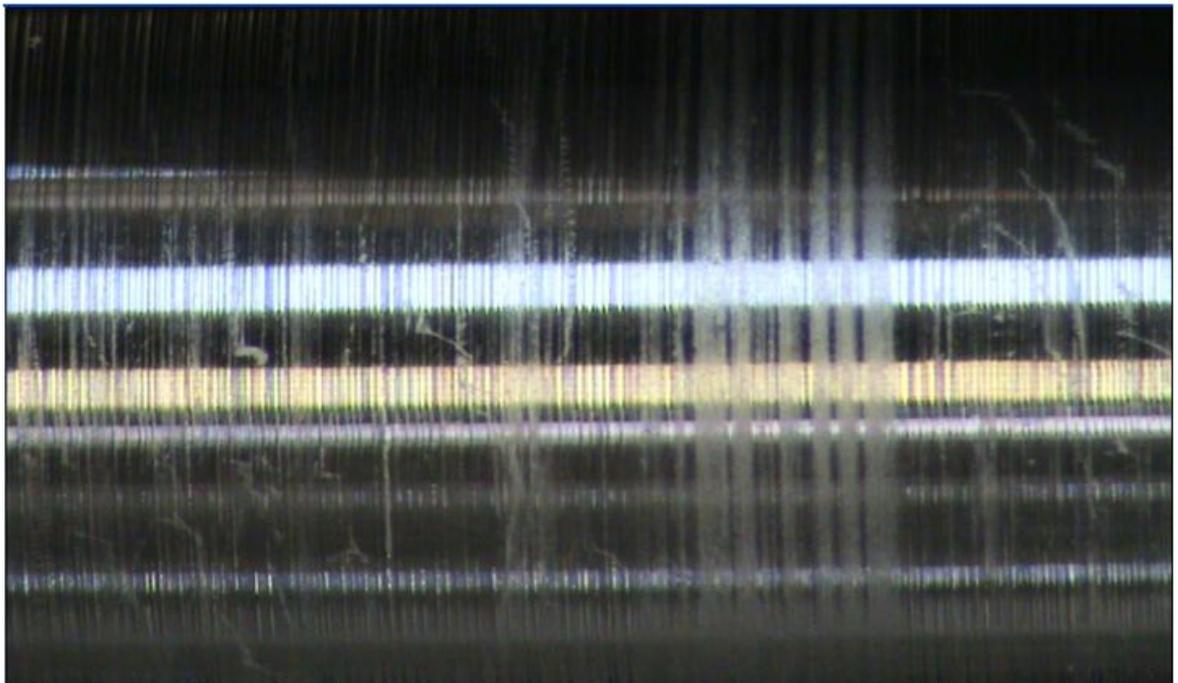
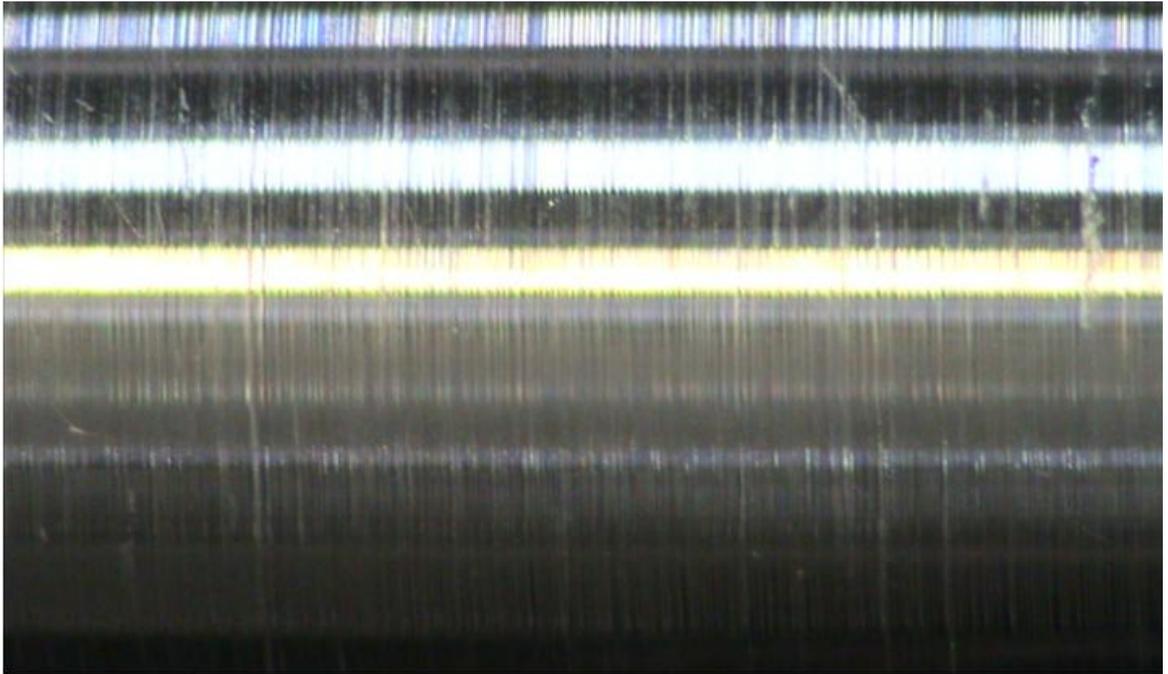
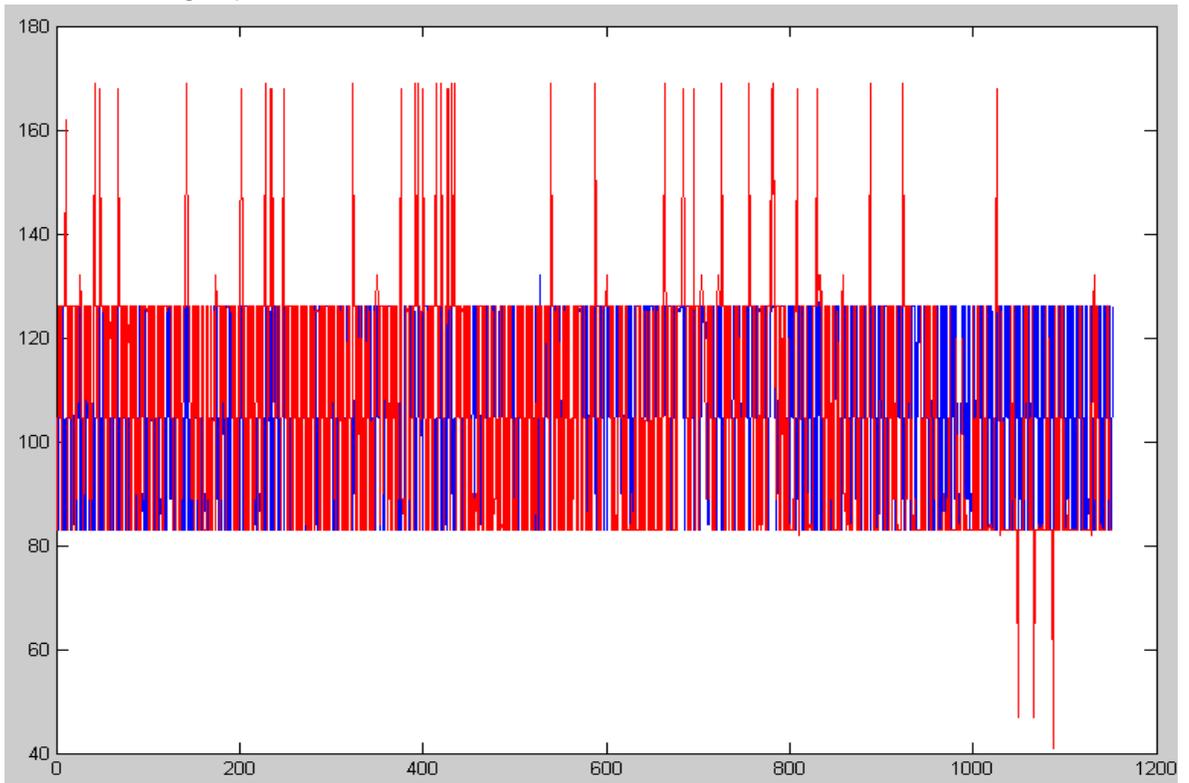


Imagen 19: Aluminio de calidad "Media". En acabado.



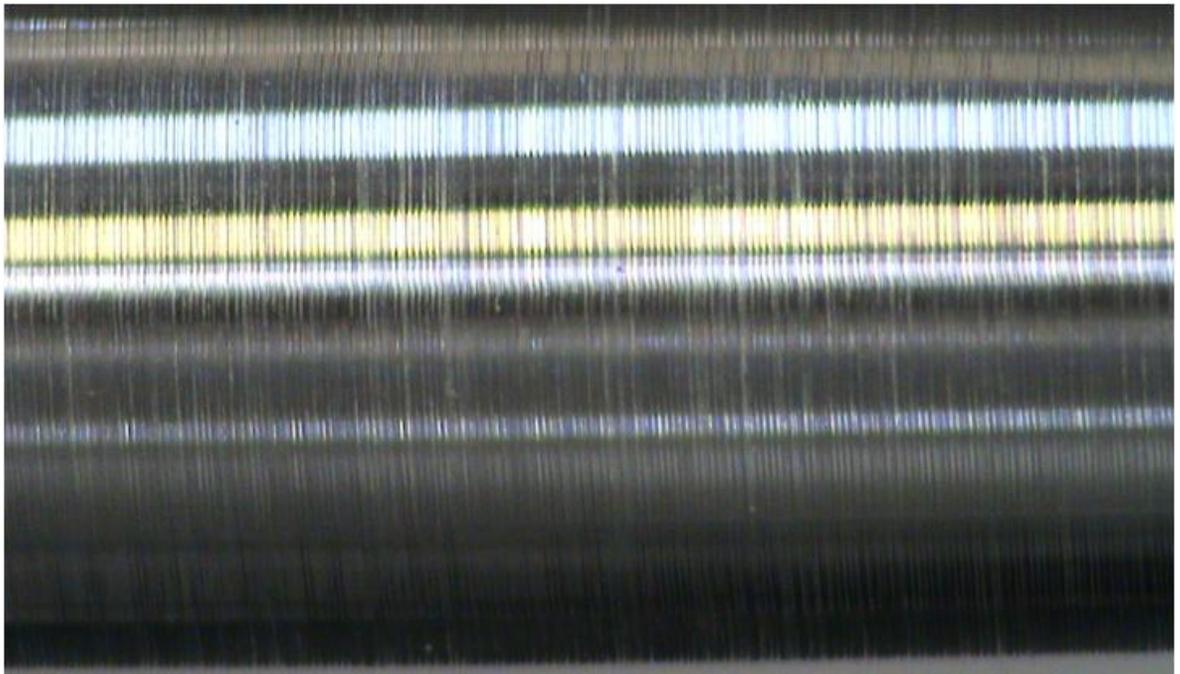
La Gráfica 12 muestra las líneas superpuestas del procesamiento de la Imagen 20. Como se puede observar las líneas tienen un comportamiento continuo con el mínimo de alteraciones a lo largo de la imagen; lo que indica una alta calidad, producida por una óptima combinación en los factores que se ejecutan en el proceso de mecanizado.

Gráfica 12: Imagen procesada de aluminio de calidad "Alta"*. En acabado.



*Las coordenadas que tienen tanto el eje horizontal como el vertical se dan en pixeles.

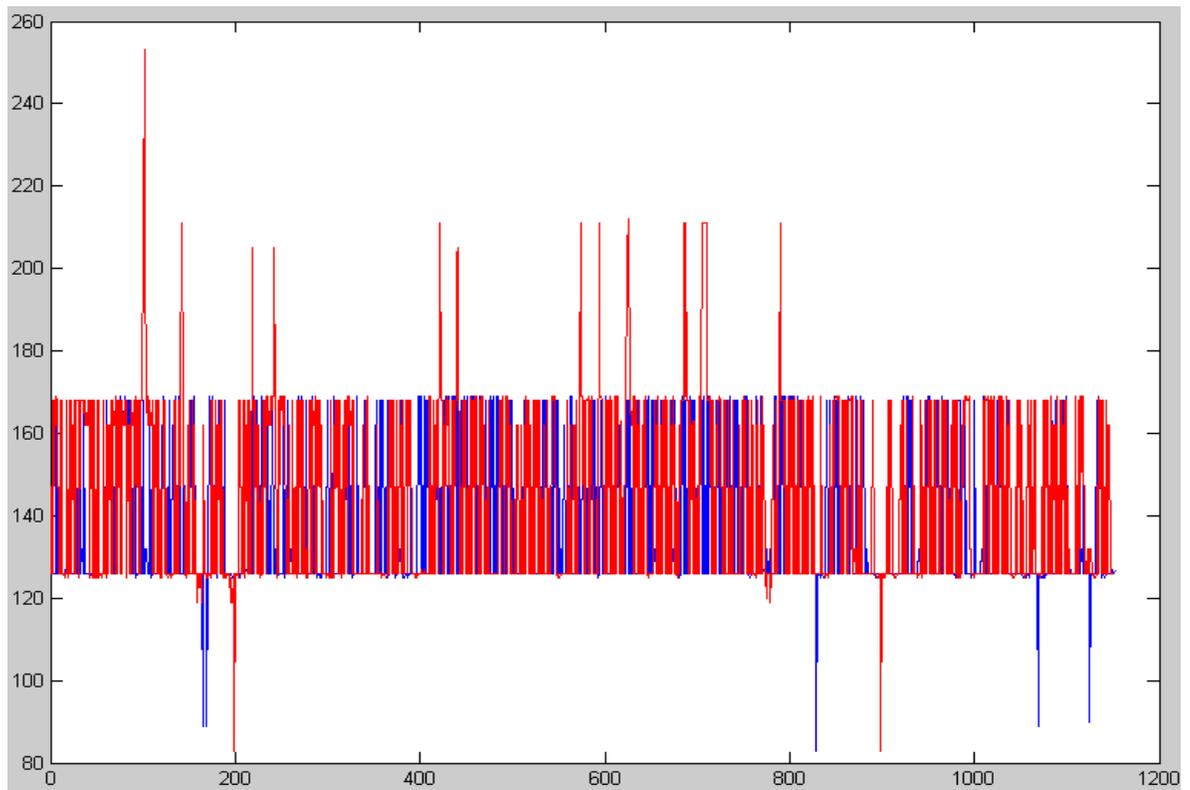
Imagen 20: Aluminio de calidad "Alta". En acabado.



La siguiente evaluación que se realizó fue en el proceso de mecanizado del bronce, el cual arrojó superficies muy similares en las diferentes pruebas y la catalogación por medios visuales no es tan evidente para una persona no experta; esto se puede apreciar en las Imágenes 21, 22 y 23.

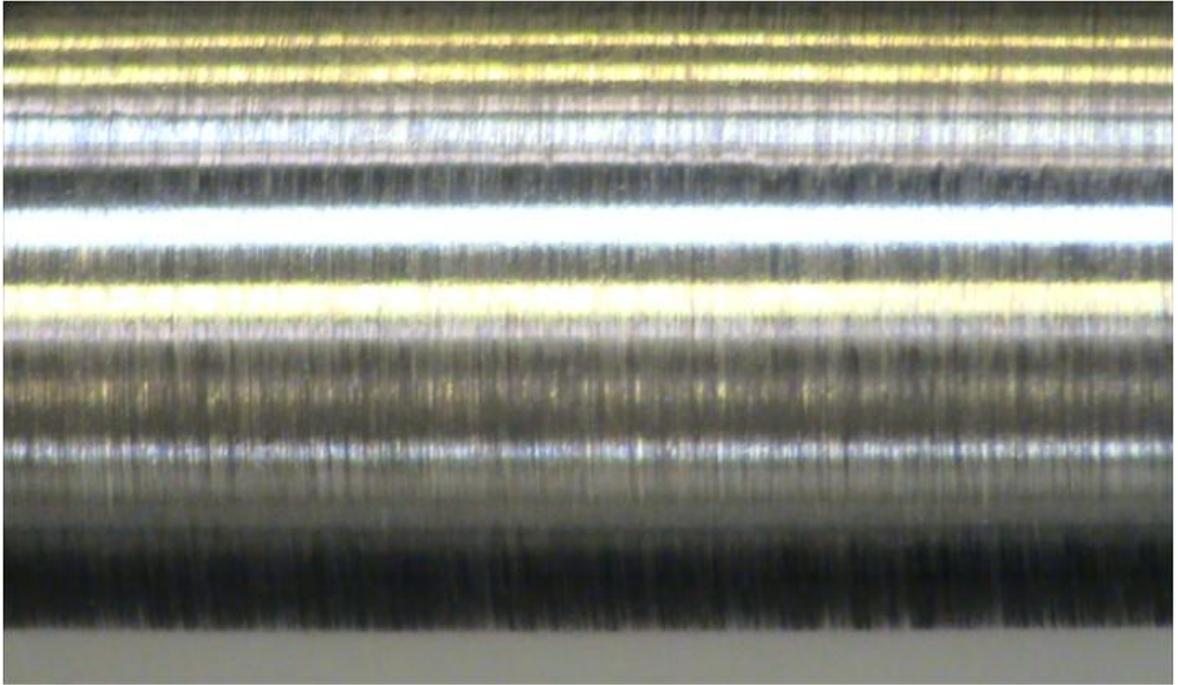
La primera imagen que se procesó fue la de bronce de baja calidad superficial. La Gráfica13 muestra vacíos en la superposición de líneas cuando sucede un cambio en la homogeneidad de la superficie analizada (Imagen 21), y éstos se ven en repetidos puntos a lo largo de la imagen; por este motivo es catalogada dentro del rango de calidad “Baja”.

Gráfica 13: Imagen procesada de bronce de calidad “Baja”*. En acabado.



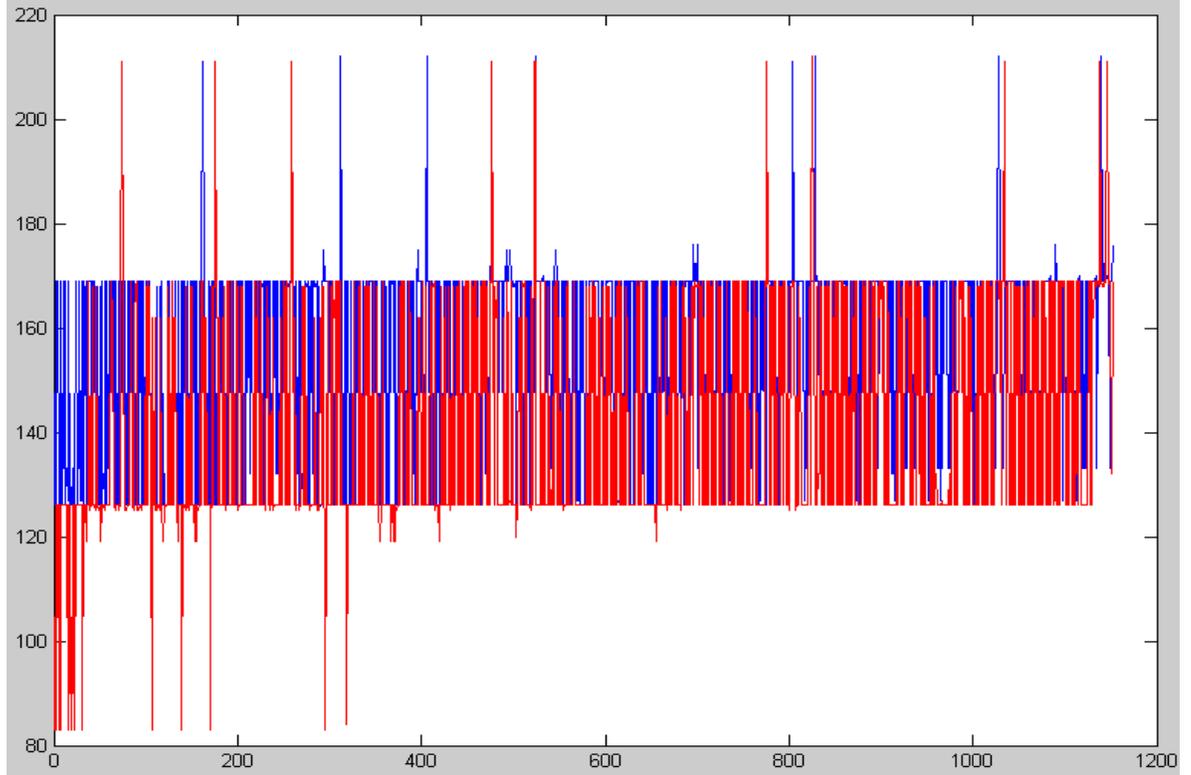
*Las coordenadas que tienen tanto el eje horizontal como el vertical se dan en pixeles.

Imagen 21: Bronce de calidad “Baja”. En acabado.



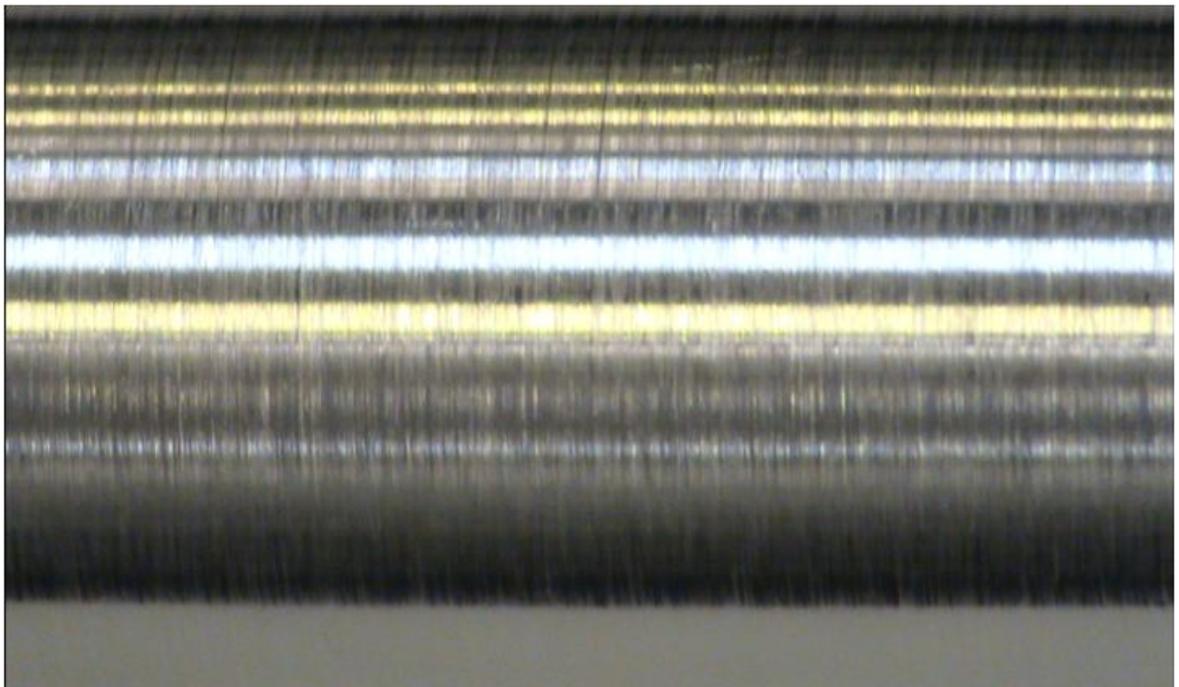
La gráfica que se muestra a continuación (Gráfica 14) es el resultado del análisis de una pieza de bronce catalogada de calidad media. En ésta se puede observar que hay una menor discontinuidad en las líneas superpuestas lo cual indica que el proceso de mecanizado fue bueno pero no excelente para los estándares de calidad superficial que se logran en el acabado de bronce.

Gráfica 14: Imagen procesada de bronce de calidad "Media"*. En acabado.



*Las coordenadas que tienen tanto el eje horizontal como el vertical se dan en píxeles.

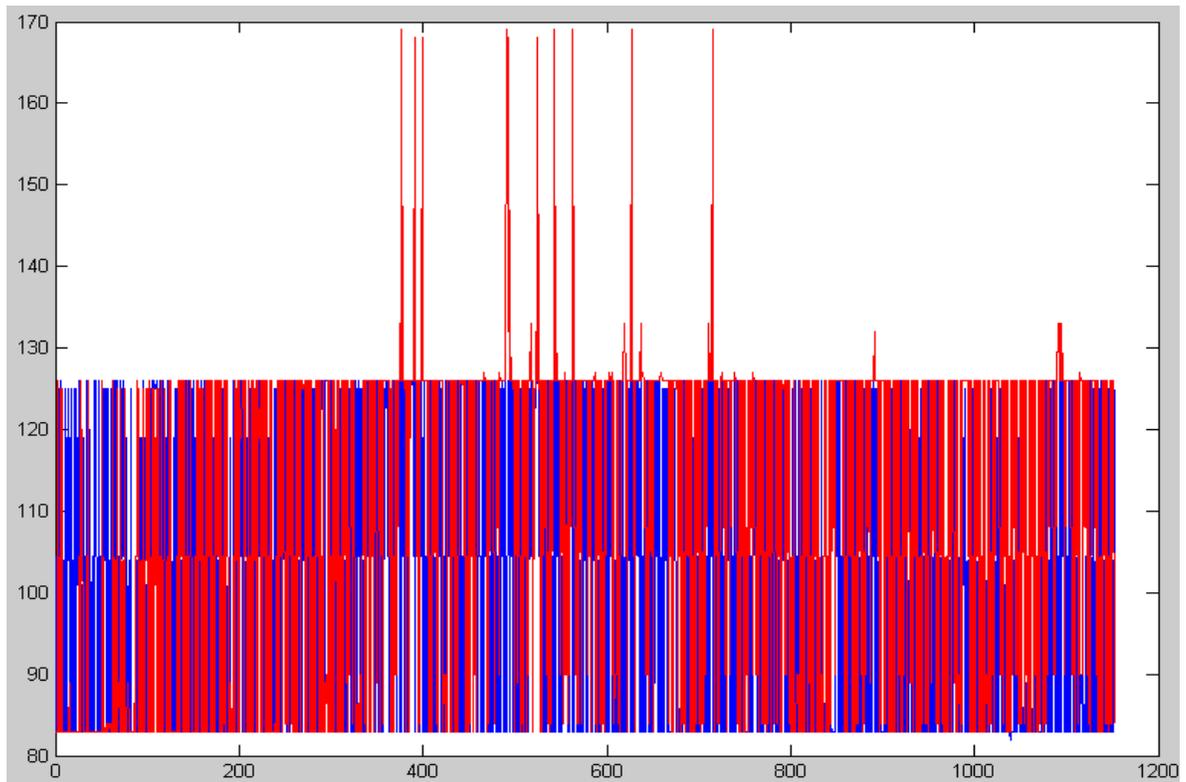
Imagen 22: Bronce de calidad "Media". En acabado.



La última imagen procesada de bronce fue catalogada de calidad “Alta” debido a la homogeneidad que se logró en el proceso de mecanizado y esto se puede observar en los resultados obtenidos del procesamiento de la Imagen 23 que se muestran en la Gráfica 15.

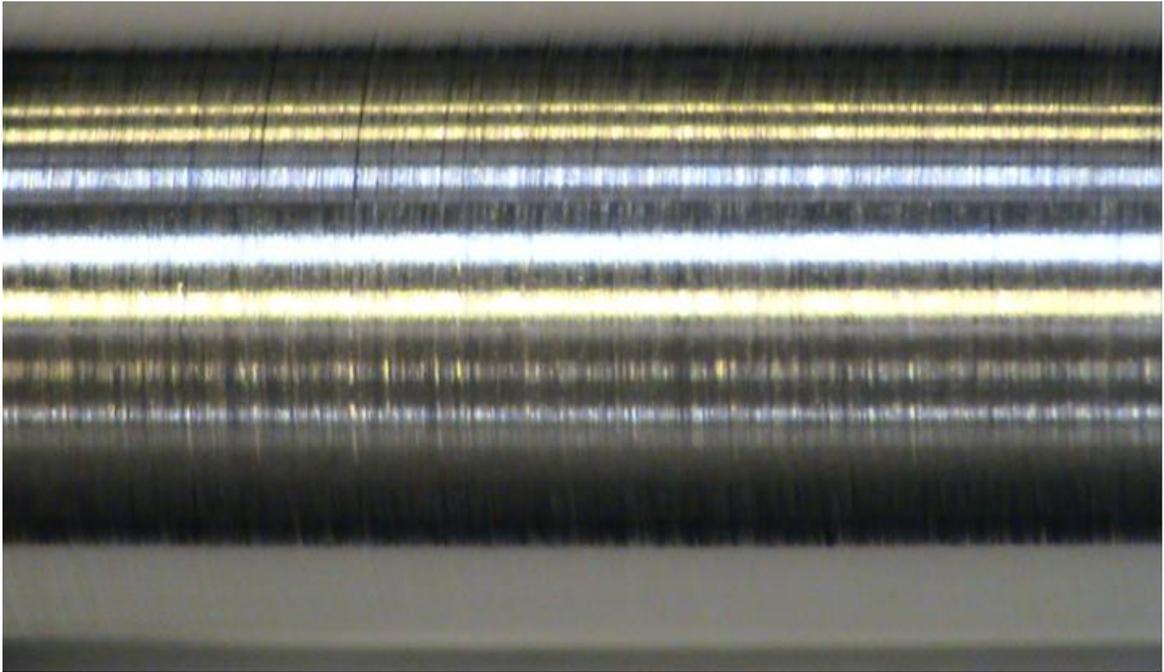
A pesar de que la Imagen 23 muestra una demarcación más fuerte en las líneas que deja el mecanizado de la herramienta, a diferencia de las imágenes 21 y 22, el proceso logra una superficie más uniforme.

Gráfica 15: Imagen procesada de bronce de calidad “Alta”*. En acabado.



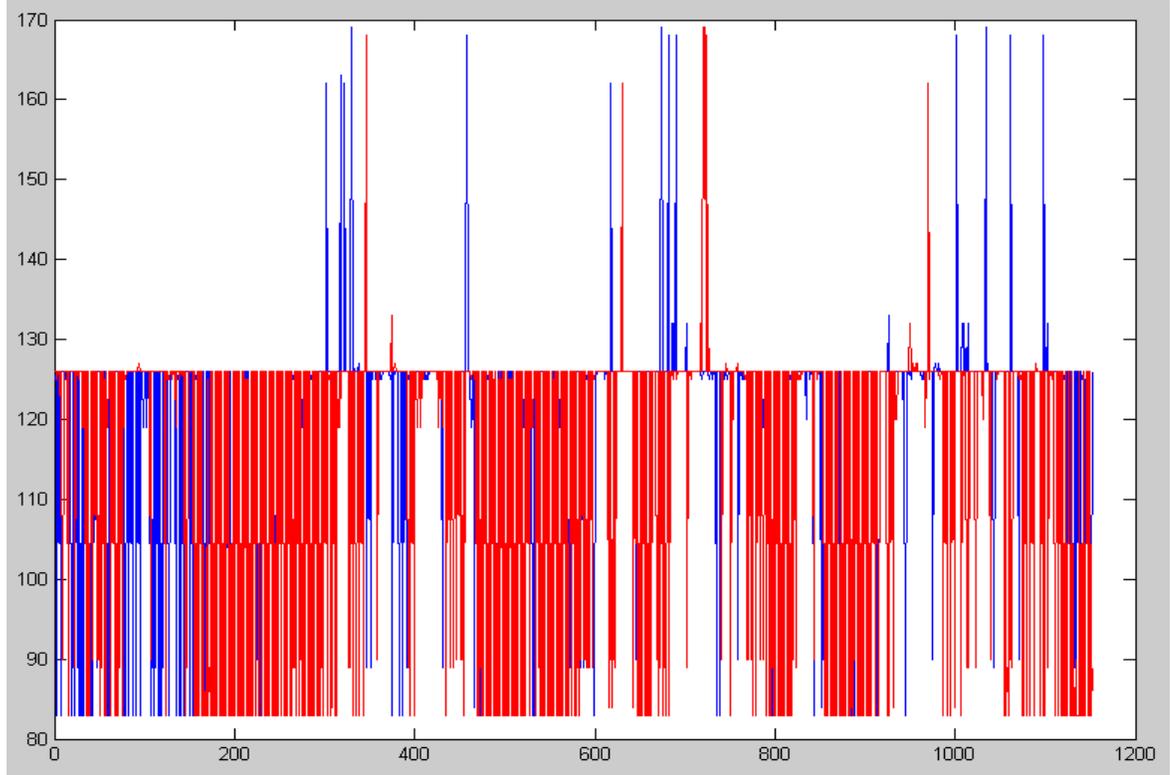
*Las coordenadas que tienen tanto el eje horizontal como el vertical se dan en píxeles.

Imagen 23: Bronce de calidad "Alta". En acabado.



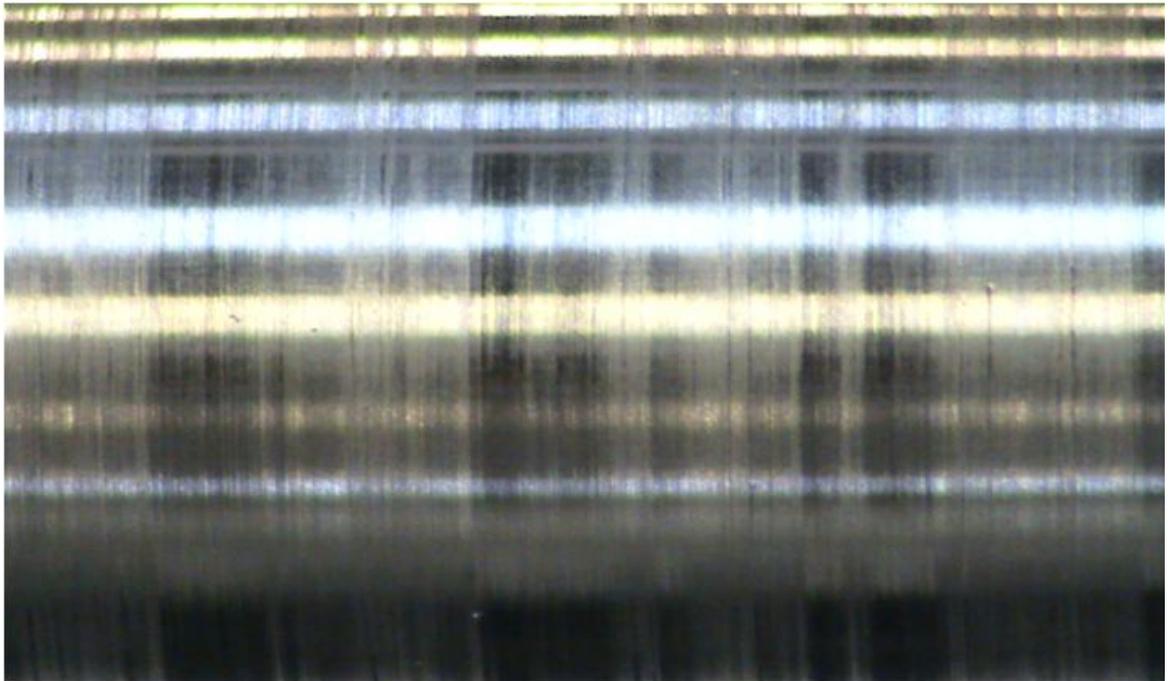
El último material analizado fue el acero y la superficie que se analizó en primera instancia fue la catalogada de calidad "Baja". La Gráfica 16 muestra los resultados obtenidos del procesamiento de la Imagen 24 en la cual se pueden apreciar las falencias de homogeneidad que se obtuvieron en el proceso de mecanizado; dada la falta en la superposición de líneas en diferentes puntos de la imagen, se determinó la calidad superficial dentro de un rango bajo.

Gráfica 16: Imagen procesada de acero de calidad "Baja"*. En acabado.



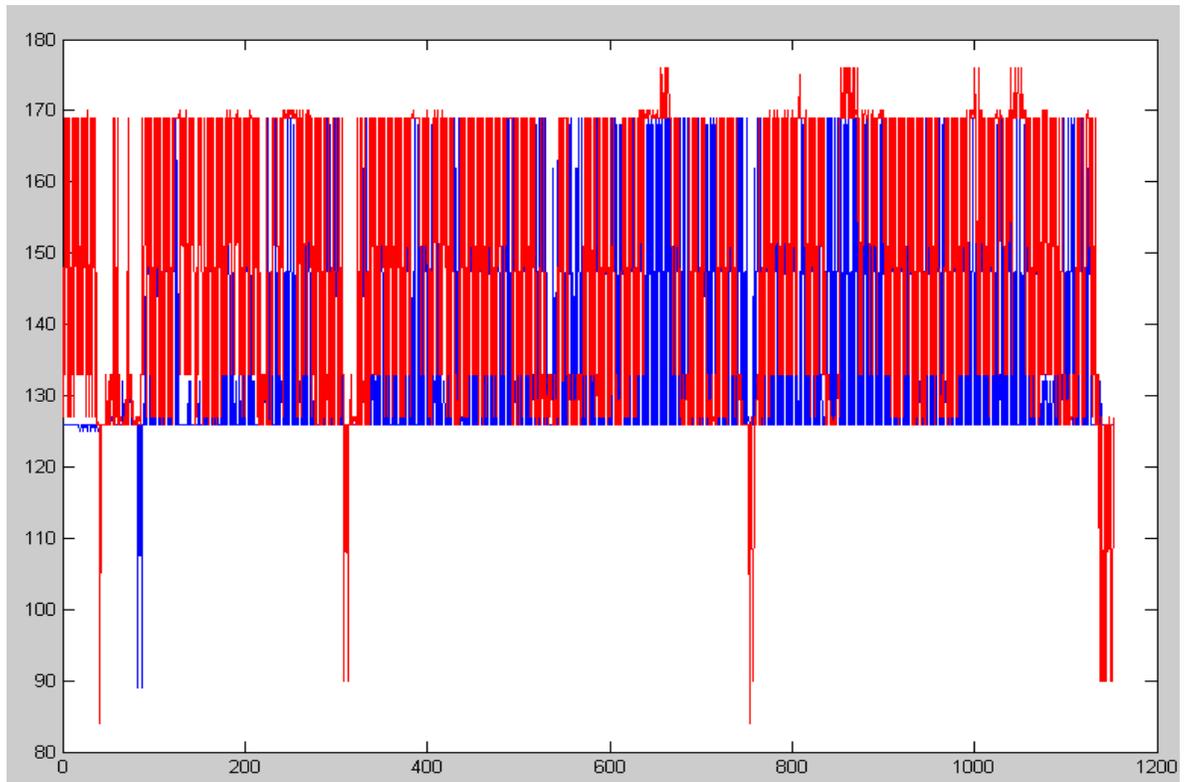
*Las coordenadas que tienen tanto el eje horizontal como el vertical se dan en píxeles.

Imagen 24: Acero de calidad "Baja". En acabado.



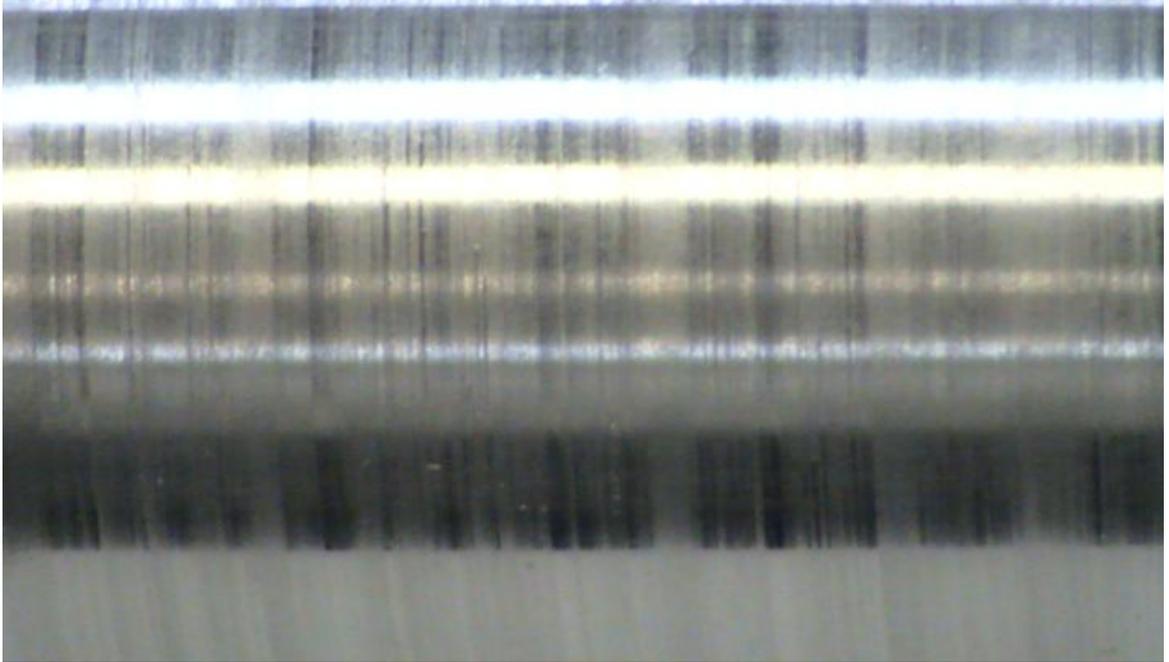
La Gráfica 17 muestra una mayor uniformidad en las líneas superpuestas, procesadas de la Imagen 25, a comparación de la determinada en la Gráfica 16 lo que indica un mejoramiento en el acabado realizado en la pieza de acero. A pesar de esto, la imagen muestra algunos vacíos, de poca amplitud, a lo largo de las líneas lo cual determina que la pieza se encuentra dentro de un rango de calidad superficial “Media”.

Gráfica 17: Imagen procesada de acero de calidad “Media”*. En acabado.



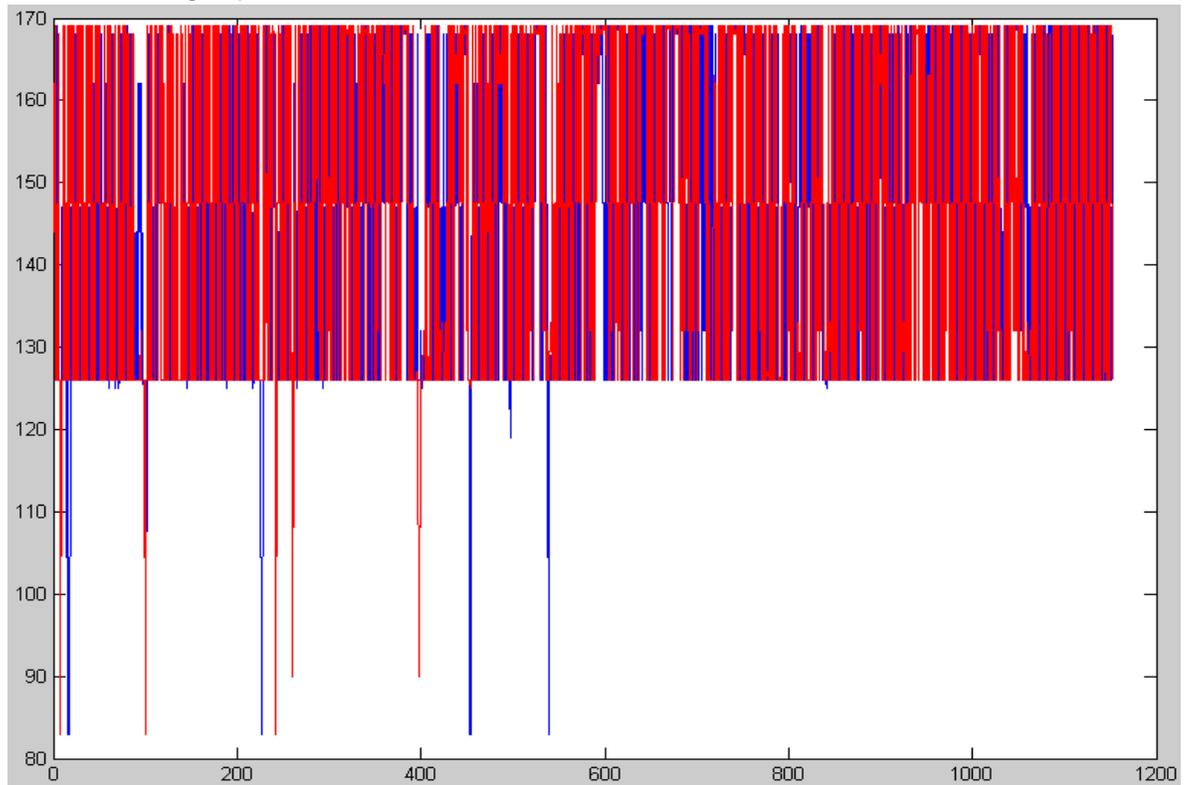
*Las coordenadas que tienen tanto el eje horizontal como el vertical se dan en píxeles.

Imagen 25: Acero de calidad "Media". En acabado.



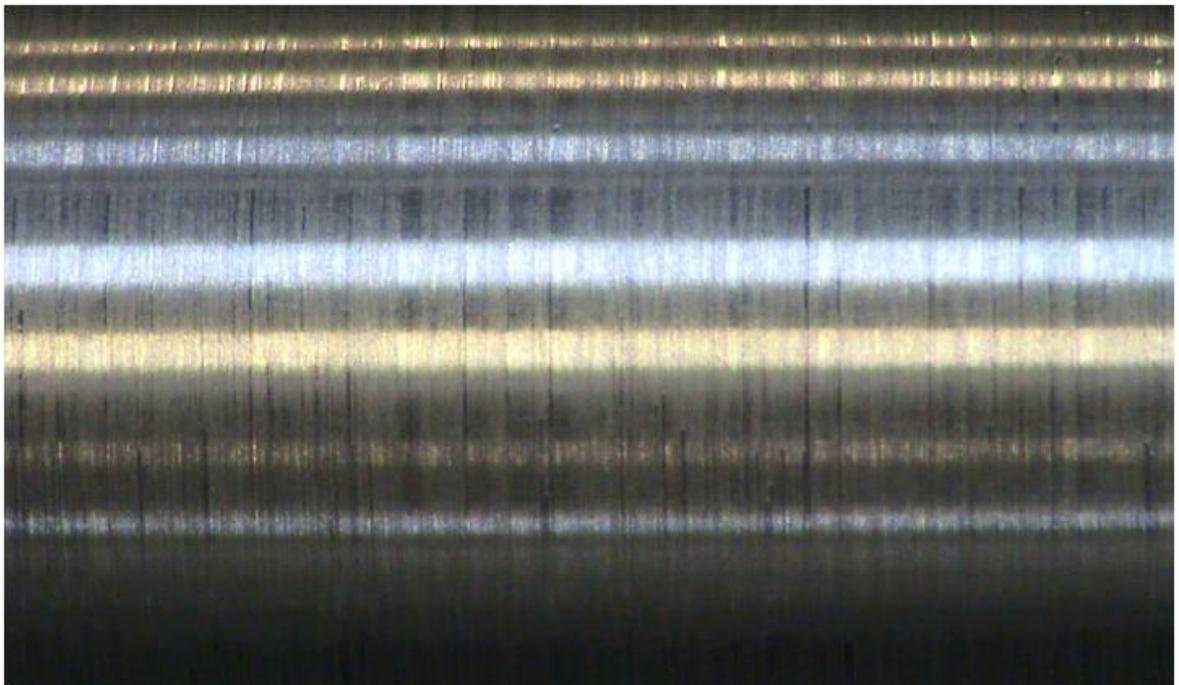
La Gráfica 18 muestra el procesamiento de la Imagen 26. El rango en el que se encuentra la calidad superficial de la pieza, dadas las características de la superposición de líneas y los rasgos de homogeneidad que se aprecian visualmente, es alto.

Gráfica 18: Imagen procesada de acero de calidad "Alta"*. En acabado.



*Las coordenadas que tienen tanto el eje horizontal como el vertical se dan en píxeles.

Imagen 26: Acero de calidad "Media". En acabado.



11. RESULTADOS RED NEURONAL

El entrenamiento que se desarrolló en las diferentes redes neuronales fue con los datos resultantes del experimento de 3 factores con 3 niveles en el proceso de desbaste y acabado. Las variables de entrada que se analizaron fueron: Profundidad de Corte, Avance, Velocidad del Husillo y Materiales. Debido a que la red no acepta variables de texto discretas los nombres de los materiales se cambiaron por números. El acero tiene el número 1, el bronce 2 y el aluminio tiene la variable numérica 3.

Igualmente, la variable de salida, que representa la calidad Alta, Media y Baja de los materiales tuvo que ser cambiada por una variable continua (numérica). Los valores que representan las calidades son: 1 para la calidad Alta, 0.5 para la calidad Media y 0 para la calidad Baja.

En la primera red que se creó se utilizaron 45 datos de los resultados del proceso de desbaste para entrenar la red neuronal y 36 datos para probar el desempeño de la misma. Los datos de prueba ingresados (Tabla 18 del Anexo D) mostraron excelentes resultados en el entrenamiento de la red, en donde se ve un seguimiento de la línea con los datos de prueba cercanos a los de la línea de predicciones hasta aproximadamente el dato 25. Luego de éste dato la red dejó de predecir los resultados y las líneas no mostraron algún tipo de relación con las predicciones previstas. (Ver Gráfica 22 en Anexo D).

Luego de realizar otras pruebas con diferentes capas y nodos y de no obtener buenos resultados al final de la gráfica, se tomó la decisión de aleatorizar los datos para analizar si el problema era el aluminio. La gráfica resultante de este entrenamiento mostró una falta de predicción a lo largo de ésta de principio a fin. Por lo tanto, se llegó a la conclusión que los datos de aluminio que estaban dispersos por la gráfica afectaban el entrenamiento de la red.

Por éste motivo se decidieron realizar dos redes neuronales distintas para el proceso de desbaste. La primera para el bronce y el acero y la segunda para el aluminio.

La red neuronal de acero y bronce se entrenó con 30 datos y se probó con los 24 datos resultantes los cuales fueron distribuidos aleatoriamente (Respectivamente Tabla 19 y Tabla 20 del Anexo E).

Se realizaron diferentes combinaciones de capas y nodos hasta que se llegó a una red de 2 capas ocultas, de 2 y 8 nodos, y una de salida con 1 nodo (Figura 12).

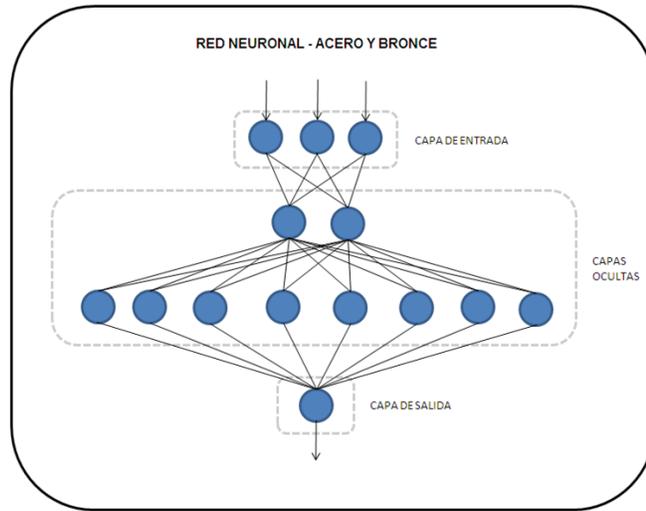
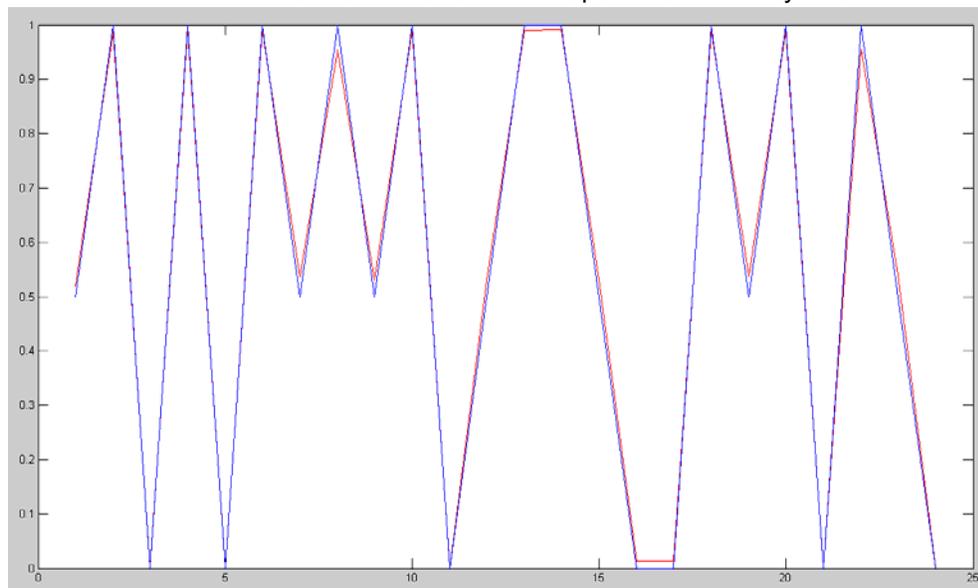


Figura 12: Red neuronal para acero y bronce. Desbaste.

La Gráfica 19 muestra el seguimiento que tuvieron los datos predichos con respecto a los de entrenamiento, la línea azul representa los datos de entrenamiento y la línea roja representa los datos de prueba. Como se puede observar las dos líneas se encuentran superpuestas en varios trayectos y muy cercanas en los otros. Esto indica un excelente entrenamiento de la red que se puede corroborar con el error de la media cuadrada (MSE) el cual es de $5.2455e-04$ e indica una mínima desviación de los datos predichos con los esperados.

Gráfica 19: Datos Predichos vs Datos Esperados. Bronce y Acero*.



*La coordenada del eje vertical muestra las calidades superficiales (de 0 a 1) y el eje horizontal muestra el número de pruebas que se realizaron.

La red neuronal de aluminio fue entrenada con 16 datos y probada con 11 (Tablas 21 y 22 Anexo F). Se realizaron pruebas en las cuales se variaron las capas y los nodos hasta llegar a 4 capas ocultas sin lograr resultados satisfactorios. La mejor red entrenada fue con 9 nodos en una capa oculta y 1 nodo en la capa de salida (Figura 13). La Gráfica 20 muestra los resultados obtenidos. El MSE de 0.1185 muestra la alta variación que tuvieron los datos predichos con respecto a los esperados a pesar de que fue el más bajo obtenido de las diferentes pruebas realizadas.

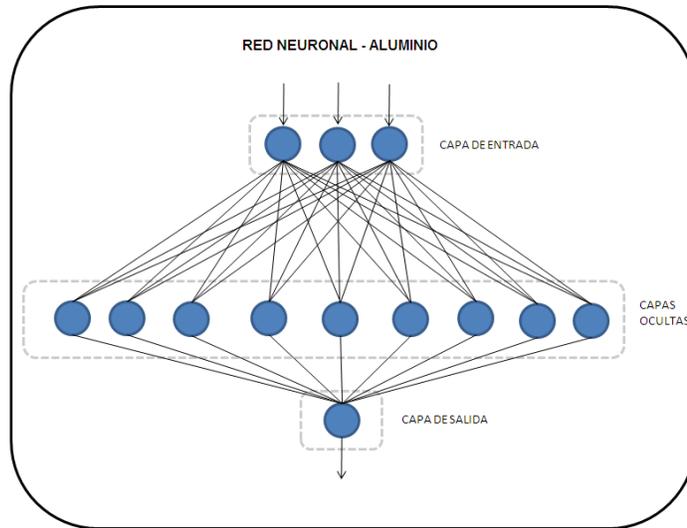
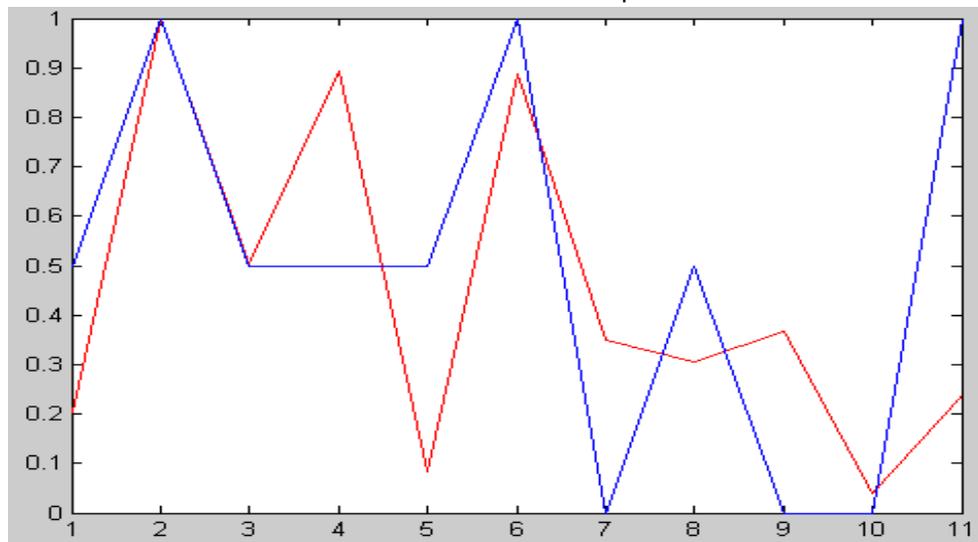


Figura 13: Red neuronal para aluminio. Desbaste

Gráfica 20: Datos Predichos vs Datos Esperados*. Aluminio.



*La coordenada del eje vertical muestra las calidades superficiales (de 0 a 1) y el eje horizontal muestra el número de pruebas que se realizaron.

Finalmente, se realizó el entrenamiento de la red para los datos del proceso de acabado. La primera prueba se realizó con los datos en orden para determinar en primera instancia si había algún material que afectara en mayor medida el comportamiento de la red. Luego de las diferentes pruebas realizadas se llegó a la conclusión de que no había un material específico que afectara el comportamiento (ver Gráfica 23 del Anexo G); por lo tanto, se decidió entrenar la red con datos aleatorizados para lograr un mejor entrenamiento.

La red se entrenó con 51 datos y se probó con 30 (Tablas 23 y 24 del Anexo H). La combinación de capas y nodos que tuvo mejor resultado tanto gráficamente como experimentalmente fue de 2 capas ocultas de 2 y 6 nodos y una capa de salida de 1 nodo (Figura 14). El MSE fue de 0.0749; este valor es aceptable para el error que tienen los datos predichos con respecto a los esperados.

En todas las pruebas se realizaron 1.000 iteraciones para entrenar la red.

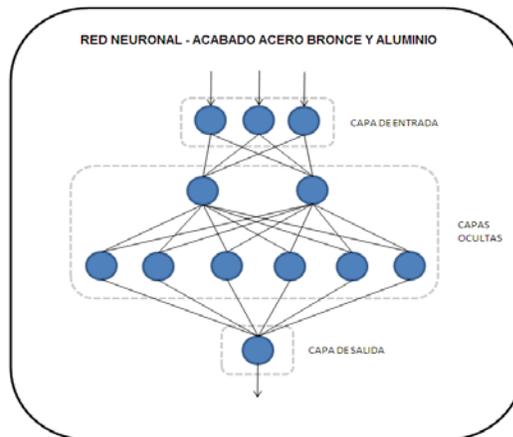
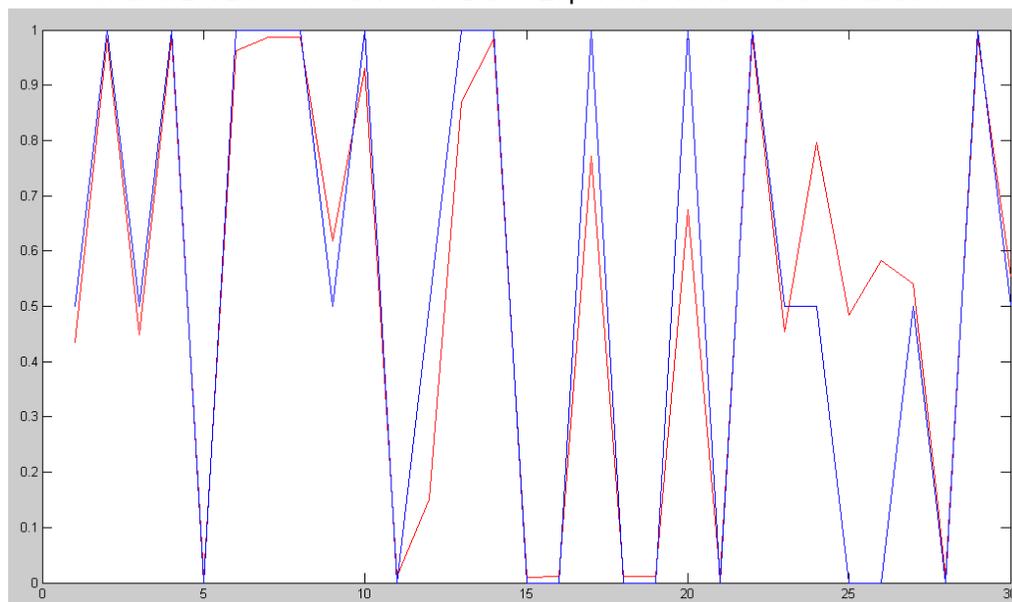


Figura 14: Red neuronal para aluminio. Desbaste

Gráfica 21: Datos Predichos vs Datos Esperados*. Proceso de acabado.



*La coordenada del eje vertical muestra las calidades superficiales (de 0 a 1) y el eje horizontal muestra el número de pruebas que se realizaron.

12. CONCLUSIONES

1. En las pruebas de viruta se mostró la respuesta de cada material a determinadas condiciones de corte. El bronce tiene excelentes propiedades para ser mecanizado y se ven reflejadas en una viruta fragmentada, que se mantuvo con la misma forma y tamaño independientemente de los parámetros de corte en los que se probó, y en las bajas temperaturas que se obtuvieron luego de los diferentes procesos.

El acero también cuenta con buenas características para los diferentes procesos de mecanizado desde el punto de vista de la viruta, debido a que ésta no interfirió en la calidad superficial resultante de las piezas procesadas y la herramienta no se vio afectada en ningún corte con éste material.

En el aluminio se detectaron problemas en el desprendimiento de viruta, primero, las características de continuidad y ductilidad hacen que la viruta se enrede en la pieza y en la mayoría de casos esto afecta la calidad superficial final de ésta, por otra parte, en algunas pruebas la viruta se adhirió a la herramienta obstaculizando el filo cortante y produciendo acabados deficientes en la pieza. Segundo, el aluminio resultó con inconsistencias en las pruebas, es decir, hubo casos en los que la herramienta arrancó la viruta del material dañando la superficie de la pieza y luego realizando la misma prueba (con los mismos parámetros), la superficie resultó con la calidad deseada y sin el problema de arranque de viruta.

Estas inconsistencias se deben, a que el aluminio es un material dúctil y su punto de fusión es bajo, por lo tanto, la temperatura que se genera por fricción en el proceso de corte lo lleva a zona plástica adhiriéndose al filo de la herramienta y desmejorando el corte. El fenómeno se ve reflejado en el acabado superficial.

2. La experimentación arrojó resultados en la determinación de parámetros, en los procesos de acabado y desbaste, muy similares para el acero y bronce.

3. Las pruebas de mejoramiento muestran, a excepción del aluminio, que los materiales resisten grandes aumentos en las variables de corte, para los procesos de desbaste, sin que la calidad superficial de las piezas se vea afectada y sin que la máquina muestre indicios de problemas de potencia. Por lo tanto el único límite al que se llegó, sin tener en cuenta el desgaste de la herramienta (que se puede ver afectado por grandes exigencias en el mecanizado), fue en el que el proceso de acabado se perjudica por el rastro que deja el inserto en el proceso de desbaste; puesto que las variables establecidas no pueden lograr el acabado requerido.

4. El aluminio presenta un excelente comportamiento en el proceso de acabado puesto que logra características superficiales de alta calidad y mantiene los resultados en diferentes pruebas (con los mismos parámetros), al igual que el bronce, mientras que el

acero tiene dificultades para alcanzar un acabado homogéneo y éste varia entre las pruebas aunque se mantengan los parámetros.

5. La velocidad de corte óptima resume las características de mecanizado que requiere cada material para lograr la superficie deseada, en éste trabajo. Siendo éste el parámetro utilizado que se mantiene constante al igual que el avance, la velocidad del husillo debe variar las revoluciones por minuto cuando se realiza un ciclo de mecanizado.

6. La herramienta de programación en Matlab® es de gran ayuda para determinar las calidades superficiales debido a que muestra los resultados siguiendo un protocolo estandarizado el cual permite al analista tener un criterio objetivo para la categorización de las superficies. El uso del procesamiento digital de imágenes permite visualizar de un modo diferente el comportamiento de patrones visuales que, de otro modo, sólo un experto puede determinarlos.

7. En las redes neuronales se debe analizar con detenimiento el comportamiento de cada material, puesto que, se pueden ver altamente afectados los algoritmos cuando determinados datos están fuera de control.

8. El uso de redes neuronales predichas es importante ya que se puede entregar cualquier combinación de parámetros a la red y con esto se pueden predeterminar las características de la pieza, sin llevar a cabo pruebas reales, con lo cual se evita desperdicio de material y se asegura la calidad de la producción.

13. RECOMENDACIONES

En primera instancia se recomienda realizar una curva de potencia para proyectar los parámetros establecidos en el presente trabajo a máquinas con diferentes características funcionales.

El comportamiento del aluminio en este trabajo evidencia la necesidad de realizar un estudio más detallado de cada una de las variables que puedan influir en la selección de los parámetros de corte, diseño de herramienta para el mecanizado del aluminio.

Se recomienda extender los procedimientos realizados en éste trabajo a otras operaciones como taladrado, refrentado y roscado en el torno. Al igual que la utilización de otros materiales.

Igualmente, se recomienda dedicar un estudio al análisis de superficies por medio reconocimiento de patrones basado en procesamiento digital de imágenes para optimizar el proceso de selección, estandarizando la toma fotográfica para que el programa realice automáticamente la categorización de las superficies con base en parámetros preestablecidos.

14. REFERENCIAS

- [1] M.P. Groover, *Fundamentals of Modern Manufacturing*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1996.
- [2] Aggarwal, H. Singhb, P. Kumarc, M. Singhd, *Optimizing power consumption for CNC turned parts using response surface methodology and Taguchi's technique—A comparative analysis*, Elsevier, 2007.
- [3] L.J. Yang, *Determination of the wear coefficient of tungsten carbide by a turning operation*, *Wear* 250 (2001) 366–375.
- [4] S. Hinduja, D. Mladenov, M. Burdekin, *Assessment of Force-Induced Errors in CNC Turning*, Elsevier.
- [5] M. Nouari, A. Molinari, *Experimental verification of a diffusion tool wear model using a 42CrMo4 steel with an uncoated cemented tungsten carbide at various cutting speeds*, *Wear* 259 (2005) 1151–1159.
- [6] J. G. Yang, Y. Q. Ren, Z. C. Du, *An application of real-time error compensation on an NC twin-spindle lathe*, *Journal of Materials Processing Technology* 129 (2002) 474-479.
- [7] John A. Schey, *Introduction to Manufacturing Processes*, McGraw Hill, 3a Edición.
- [8] S. Kalpakjian, *Manufactura, Ingeniería y Tecnología*, Pearson Educación, 4a Edición.
- [9] I. Mukherjee, P. K. Ray, *A review of optimization techniques in metal cutting processes*, *Science Direct* (2006)
- [10] R. K. Roy, *Design of experiments using the taguchi approach 16 steps to product and process improvement*, John Wiley & Sons, 2001, 1a Edición.
- [11] P. G. Benardos, G. C. Vosniakos, *Prediction of surface roughness in CNC face milling using neural networks and Taguchi's design of experiment*, *Robotics and Computer Integrated Manufacturing* 18 (2002) 343–354.
- [12] Universidad Tecnológica, *Tutorial Redes Neuronales* (En Línea) <<http://ohm.utp.edu.co:16080/neuronales/main.htm>> (Citado: Octubre de 2009)

- [13] Universidad de Valparaíso, *Redes Neuronales Artificiales*, (En Línea) <http://www.inf.utfsm.cl/~rsalas/Pagina_Investigacion/docs/Apuntes/Redes%20Neuronales%20Artificiales.pdf> (Citado: Octubre de 2009)
- [14] National Instruments, *Implementing Neural Networks with LabVIEW – An Introduction*, (En Línea), <<http://zone.ni.com/devzone/cda/tut/p/id/2811>> (Citado: Septiembre de 2009)
- [15] U. Zuperl, F. Cus, B. Mursec, T. Ploj, *A hybrid analytical-neural network approach to the determination of optimal cutting conditions*, Elsevier, 2004.
- [16] B. Santosa, *Introduction to Matlab neural network Toolbox*, (En Línea), <<http://www.docstoc.com/docs/2681223/INTRODUCTION-TO-MATLAB-NEURAL-NETWORK-TOOLBOX>>, (Citado: Septiembre de 2009)
- [17] C. Escobar, F. Valderrama, *Tratamiento de texturas aplicado a la tracción de un móvil*, Trabajo de Grado, 2005.
- [18] Molina, R., *Introducción al Procesamiento y Análisis de Imágenes Digitales*, Departamento de ciencias de la computación, Universidad de granada, Memorias de curso impartido en introducción a la robótica hasta 1998.
- [19] Tuceryan, Mihran, JAIN, Anil K., *The Handbook of Patter Recognition and Computer Vision* (Second edition), Texture analysis, pp. 207-248, 1998.
- [20] R. Saravanan, *Manufacturing Optimization through Intelligent Techniques*, Taylor & Francis.
- [21] P. F. Oswald, *Manufacturing Processes and Systems*, Wiley, 9na Edición.
- [22] R. O. Kuehl, *Diseño de experimentos principios estadísticos de diseño y análisis de investigación*, International Thomson editores, 2ª Edición.
- [23] M. Manrique, J. M. Marroquin, L. Prieto, *Diseño de una Metodología de enseñanza aprendizaje para los estudiantes de la carrera de ingeniería industrial aplicable a la modalidad de créditos*, 2003.

14.1 EXPERTOS

Experto1: Jorge Andrés Alvarado Valencia

- Ingeniero industrial, Pontificia Universidad Javeriana.
- Máster en Educación, Pontificia Universidad Javeriana.
- "Master of Science in Analytics" at North Carolina State University .

Experto2: Martha Ruth Manrique Torres

- Licenciada en Mecánica y Dibujo, Universidad Pedagógica Nacional de Colombia.
- Especialista en Control Numérico, Servicio Nacional de Aprendizaje - SENA
- Magister en Educación, Pontificia Universidad Javeriana.
- Maestría en Ingeniería Electrónica, Pontificia Universidad Javeriana

Experto3: Lucy Manrique Hernandez

- Licenciada en Mecánica y Dibujo, Universidad Pedagógica Nacional de Colombia.
- Diseñadora Industrial, Universidad Nacional
- Maestría en Edumática, Universidad Autónoma

Experto4: Gabriel Mauricio Zambrano Rey

- Ingeniero Electrónico Universidad Industrial de Santander
- Máster en Ingeniería Electrónica Pontificia Universidad Javeriana

ANEXOS

Anexo A

Tabla 16: Resultados Calibrador. Medidas Ascendentes.

ASCENDENTE									
# Prueba	# Anillo	Diametro Externo (in)	Diametro Interno (in)	Diametro Externo (mm)	Diametro Interno (mm)	Referencia Diametro Externo	Referencia Diametro Interno	Diferencia Diametro Externo	Diferencia Diametro Interno
1	5	0,7485	0,3935	19,0119	9,9949	19,0208	10,0357	0,0089	0,0408
2	4	0,7480	0,4745	18,9992	12,0523	19,0159	12,0688	0,0167	0,0165
3	3	0,7495	0,3295	19,0373	8,3693	19,0193	8,3827	-0,018	0,0134
4	2	0,7485	0,4395	19,0119	11,1633	19,0178	11,2236	0,0059	0,0603
5	1	0,7480	0,3605	18,9992	9,1567	19,0152	9,2059	0,016	0,0492
6	6	0,7485	0,3290	19,0119	8,3566	19,0152	8,3790	0,0033	0,0224
7	7	0,7485	0,4395	19,0119	11,1633	19,0168	11,2657	0,0049	0,1024
8	8	0,7485	0,3955	19,0119	10,0457	19,0190	10,0731	0,0071	0,0274
9	9	0,7485	0,3610	19,0119	9,1694	19,0164	9,2119	0,0045	0,0425
10	10	0,7480	0,3610	18,9992	9,1694	19,0165	9,1837	0,0173	0,0143
11	15	0,7485	0,3280	19,0119	8,3312	19,0174	8,3684	0,0055	0,0372
12	14	0,7485	0,3985	19,0119	10,1219	19,0172	10,1525	0,0053	0,0306
13	13	0,7480	0,4390	18,9992	11,1506	19,0109	11,1912	0,0117	0,0406
14	12	0,7480	0,4770	18,9992	12,1158	19,0149	12,1071	0,0157	-0,0087
15	11	0,7480	0,4770	18,9992	12,1158	19,0142	12,2205	0,015	0,1047
PROMEDIO								0,007986667	0,039573333

Tabla 17: Resultados Calibrador. Medidas Descendente

DESCENDENTE									
# Prueba	# Anillo	Diametro Externo (in)	Diametro Interno (in)	Diametro Externo (mm)	Diametro Interno (mm)	Referencia Diametro Externo	Referencia Diametro Interno	Diferencia Diametro Externo	Diferencia Diametro Interno
1	11	0,7480	0,4770	18,9992	12,1158	19,0142	12,2205	0,015	0,1047
2	12	0,7480	0,4775	18,9992	12,1285	19,0149	12,1071	0,0157	-0,0214
3	13	0,7480	0,4395	18,9992	11,1633	19,0109	11,1912	0,0117	0,0279
4	14	0,7485	0,3990	19,0119	10,1346	19,0172	10,1525	0,0053	0,0179
5	15	0,7485	0,3280	19,0119	8,3312	19,0174	8,3684	0,0055	0,0372
6	10	0,7480	0,3610	18,9992	9,1694	19,0165	9,1837	0,0173	0,0143
7	9	0,7485	0,3610	19,0119	9,1694	19,0164	9,2119	0,0045	0,0425
8	8	0,7485	0,3955	19,0119	10,0457	19,0190	10,0731	0,0071	0,0274
9	7	0,7485	0,4400	19,0119	11,176	19,0168	11,2657	0,0049	0,0897
10	6	0,7485	0,3290	19,0119	8,3566	19,0152	8,3790	0,0033	0,0224
11	1	0,7480	0,3610	18,9992	9,1694	19,0152	9,2059	0,016	0,0365
12	2	0,7485	0,4400	19,0119	11,176	19,0178	11,2236	0,0059	0,0476
13	3	0,7480	0,3285	18,9992	8,3439	19,0193	8,3827	0,0201	0,0388
14	4	0,7480	0,4740	18,9992	12,0396	19,0159	12,0688	0,0167	0,0292
15	5	0,7485	0,3945	19,0119	10,0203	19,0208	10,0357	0,0089	0,0154
PROMEDIO								0,010526667	0,03534

PROMEDIO D.EXT
0,009256667

Las Tablas 16 y 17 muestran los resultados de las mediciones realizadas con el calibrador, marca Mitutoyo, a 15 anillos para determinar el margen de error. Las pruebas se realizaron tomando el diámetro exterior de cada anillo en orden ascendente y luego descendente. Los datos se compararon con el diámetro estipulado por El laboratorio de Mediciones Geométricas (Anexo B), y se determinó un promedio de margen de error para el calibrador de 0.0092in restando el error significativo del calibrador que es de 0.0005in, el error resultante es de 0.0087in. Esto significa que los errores que se encuentran por debajo de éste valor no pueden ser considerados.

Anexo B

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE PROCESOS PRODUCTIVOS
Control Numérico Computarizado**

Autores:

**Lcda. Martha Ruth Manrique Torres
Ing. Juan Manuel Marroquín Gutiérrez
Ing. Lena Prieto Contreras**

CONTENIDO

- 1. Introducción**
- 2. Descripción del lenguaje de programación CNC.**
- 3. Protocolo de operación.**
- 4. Precauciones de manejo**
- 5. Cuidados del equipo.**

RESUMEN

El capítulo pretende recoger los aspectos relacionados con el Control Numérico Computarizado CNC y que permiten la programación y operación de una máquina que involucra este sistema, para tal fin se da inicio contextualizando al lector con lo que ha sido el desarrollo histórico del sistema y la importancia del mismo en el campo productivo

1. INTRODUCCIÓN

Los retos para las empresas dedicadas a la producción de bienes son dos: la calidad y la cantidad; la calidad está relacionada con la precisión dimensional y la precisión en la forma, es decir con el factor de repetitividad del producto, mientras que la cantidad está relacionada con la debida eliminación de los tiempos muertos durante el proceso

productivo; de ahí que la permanencia en el mercado y la competitividad en esté dependan de la posibilidad que tenga la empresa de convertir estos retos en logros.

En consecuencia, la industria ha desarrollado un sin número de metodologías para la manufactura de productos, las cuales podemos agrupar en tres categorías de acuerdo con la función que cumplen dentro del proceso. La primer categoría consiste en dispositivos acoplables a máquinas ya existentes que cualifican sus formas de operar, ejemplo, pantógrafos, elevadores, sistemas rápidos de sujeción y montaje y alimentadores entre otros; la segunda categoría consiste en una serie de máquinas a las que se les ha incorporado sistemas de control, ejemplo, sensores, controladores lógicos programables servomotores y procesadores y la última categoría consisten en máquinas a las que se les han incorporado componentes de los dos primeros grupos permitiendo nuevas formas de manufactura, dispositivos de control que les permite auto regularse y procesadores que les permiten almacenar datos y manejar variables durante el proceso y es quizá una de las más importantes por su trascendencia, origen y proyección; a esta categoría la denominamos *CNC (Control Numérico Computarizado)*.

Esta metodología se originó a finales de la segunda guerra mundial, obedeciendo a la demanda de armas propia del momento, en ese entonces se le conocía como *CN*. Pasada la guerra, continuó su evolución ya que había logrado incursionar en el sistema productivo pasando a ser dominio de las empresas como herramienta de innovación en sus formas de producción, mas adelante con el desarrollo del procesador y la incorporación del mismo a comienzos de los 70s, el *CN* debió cambiar de nombre a *CNC*. Adicionalmente, la incorporación del *CNC* a la industria permite la reducción en el número de máquinas en relación con las operaciones de trabajo ya que esté otorga mayor flexibilidad en la función y la forma de procesar, un claro ejemplo lo constituye el centro de mecanizado, que incorpora las funciones del taladro, del torno y de la fresadora.

El *CNC* consta de mecanismos simples de tornillos de bolas recirculantes que facilitan el desplazamiento sin vibración y reducen significativamente el desgaste, terminados en servomotores controlados por un procesador y que mantienen comunicación con el usuario mediante un tablero de control y con un lenguaje de programación universal: el lenguaje *ISO*. Además la evaluación constante del sistema y el proceso de retroalimentación ha unido a los usuarios con los fabricantes de manera que las primeras máquinas con controles particulares han pasado a ser universales, compatibles e intercambiables.

1. DESCRIPCIÓN DEL LENGUAJE DE PROGRAMACIÓN CNC.

Teniendo en cuenta que el *CNC* es un sistema productivo, debe ser un sistema universal, luego la programación de este requiere de la codificación de todas las operaciones de la máquina, los códigos deben ser simples de tal manera que ocupen el menor espacio posible en la memoria del procesador, condición importante teniendo en cuenta la

evolución del procesador desde la década de los 70 a la década de los 2000, para esto el lenguaje *ISO* emplea dos tipos de código los *G* que corresponden a instrucciones geométricas¹¹ y los *M* que a su vez corresponden a los misceláneos¹²; las instrucciones se diferencian por el número que sucede a la letra *G* o *M*, por ejemplo *G20*, *G70* o *M5*, *M30*, la construcción de un código compuesto por letras y números es lo que permite que se les denominen códigos alfanuméricos.

Para comprender el proceso de programación no es suficiente el reconocer e identificar los códigos, se requiere también conocer las formas de trabajo, los ejes de movimiento y los grados de libertad de una máquina *CNC*. A manera de aclaración se recordará algunos de estos aspectos.

- Los ejes de una máquina son *x*, *y*, *z* como ejes principales y los ejes relativos son *u*, *v*, *w* en la misma correspondencia, para ubicar correctamente los ejes se debe tener en cuenta que el plano *x*, *y* siempre se ubica perpendicular al husillo¹³ de la máquina.
- Una máquina tiene tres posiciones cero la primera consiste en el cero de fabricación que siempre debe estar en el extremo centro del husillo principal, el segundo cero corresponde a la ubicación de capacidad máxima de la máquina para mecanizar una pieza conocido como *home* o coordenadas de trabajo y el tercero consiste en cero de posicionamiento sobre la pieza para el proceso de mecanizado
- Las operaciones de mecanizado de cualquier máquina describen movimientos de tres tipos, rectilíneo en cualquier dirección, circular a la izquierda y circular a la derecha.

Algunos de los códigos empleados en la programación se describen a continuación:

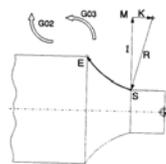
2.1 Códigos Geométricos

G0 Avance rápido

N50 G0 X_ Y_ Z_

G1 Interpolación lineal

N70 G1 Z_ F100



G2 Interpolación circular horaria

N80 G2 X_ Y_ R_ (radio)

G3 Interpolación circular antihoraria

N100 G3 X_ Y_ R_ (radio)

G04 Parada opcional por el número *F* de segundos que se asignen.

G28 Ir a 0 de máquina

¹¹ Son los que describen la geometría o influyen en ella como la forma y unidades de medida.

¹² Son los que sirven de complemento pero que no afecta la geometría de la pieza.

¹³ El husillo de una máquina es el elemento de giro que recibe el movimiento principal.

G40 Sin compensación de radio de herramienta
G41 Compensación de radio de herramienta por izquierda
 N110 G41 D_ (número *offset* radio)
G42 Compensación de radio de herramienta por derecha
 N120 G42 D_

G43 Compensación de altura de herramienta dirección +
 N130 G43 H_ (número de *offset* altura)
G44 Compensación de altura herramienta dirección –
G49 Cancela compensación de altura
G54 Selecciona Cero de pieza (hasta G59)

G70 Unidades en pulgadas
G71 Unidades en mm
G72 Ciclo de acabado
G73 Ciclo de cilindrado en desbaste
G80 Cancela ciclo
G81 Ciclo de taladrado sencillo
G82 Ciclo de taladrado con tiempo de espera en el fondo
G83 Ciclo de taladrado con desahogo
G90 Coordenadas absolutas
G91 Coordenadas incrementales
G92
G95 Avance en mm/rev
G96 Velocidad de corte constante (mm/min)
G97 Velocidad de giro constante (rev/min)

2.2 Códigos Misceláneos

M3 Encender husillo horario
 N60 M3 S_
M4 Encender husillo antihorario
M5 Apagar husillo
M6 Cambio de herramienta
 N90 M6 T_
M2 (M30) Fin de programa
M98 Llamar subprograma

M99 Fin de subprograma

Otros códigos empleados en la programación, son los que describen parámetros de trabajo como:

S velocidad de giro del husillo en RPM
F avance en mm/min o mm/rev.

N línea de programación.
T herramienta.
R radio
i, j, k coordenadas de centro para los ejes x, y, z.

Los códigos son únicos sin importar el control, fabricante o tipo de máquina, la variación se presenta en la forma como se escribe el programa, en especial en el encabezado o aprestamiento y este depende de la máquina y del tipo de control, en el mercado existe un número aproximado a 120 tipos de control diferentes, siendo el más reconocido el control *FANUC*. A propósito de la programación, la estructura de un programa contiene tres etapas encabezado o aprestamiento, cuerpo y cierre, a continuación se presenta un ejemplo.

Aprestamiento

N10 G90 G71 G40 G49 G80; condiciones iniciales

N20 G54; selección del 0 de pieza

N30 M6 T1; cambio a herramienta : ejemplo a herramienta 1

N40 M3 S2000; prender husillo horario: ejemplo 2000 rpm

Cuerpo (de acuerdo con la geometría de la pieza)

N50

.

:

N200

Cierre

N210 M5; apagar husillo

N220 G28; ir a *home*

N230 M2; fin de programa

3 PROTOCOLO DE OPERACIÓN

3.1 TORNO EMCO PC 125

3.1.1 PROGRAMACIÓN DE TORNO EMCO PC 125

Algunas consideraciones de la máquina:

2 ejes.

Velocidad máxima 50 m/min.

Presión de trabajo: 58 – 90 psi

Cambiador de herramientas con 8 estaciones sobre carrusel.

T01= Butil derecho de desbaste *offset* 01

T02= Espacio para buril interior
T03= Espacio para broca
T04= Buril de roscado exterior *offset 04*
T05= Cuchilla de tronzado *offset 05*

T06= Buril neutro de acabado *offset 06*
T07= Buril derecho de acabado *offset 07*
T08= Cuchilla de ranurado *offset 08*

T0_0_ - CAMBIO DE HERRAMIENTA
T0__0__

N35 **T0101**; Cambie a herramienta 1 con *offset 1*

3.1.2 Códigos importantes para trabajar en el torno Emco pc 125:

M04 – ENCENDER HUSILLO ANTIHORARIO

N40 **M04** S__ ; A diferencia de fresado, muy utilizado en torno

G95 - AVANCE en mm/rev. Los valores programados para F (avance) son en mm/rev. Vincula el desplazamiento de la herramienta con la velocidad de giro del material

G96 – VELOCIDAD DE CORTE CONSTANTE mm/min

N45 **G96** F__ ; Velocidad de corte constante para buen acabado en operaciones e cilindrado y refrentado (Ejemplo F 0.4)

G97 - VELOCIDAD DE GIRO CONSTANTE rev/min

CICLOS:

Instrucciones simplificadas que se usan en operaciones típicas repetitivas para reducir la cantidad de instrucciones y datos en la programación.

G73 - CICLO DE TORNEADO LONGITUDINAL, DESBASTE

Dos bloques

N60 **G73** U_ R_ ; Profundidad de corte U_ mm incremental sin Signo, con retroceso W_.

N65 **G73** P_ Q_ U_ W_;

P: número del bloque inicial que define contorno

Q: número del bloque final que define contorno

U: sobre material de acabado en X (mm)

W: sobre material de acabado en Z

G72 - CICLO DE ACABADO

Solo puede programarse después del desbaste con G73; ejecuta el acabado llevando la pieza a la dimensión final

N70 **G72** P_ Q_ ;

P: número del bloque inicial que define contorno

Q: número de bloque final que define contorno 01

3.1.3 Torno estructura de programa para cilindrado

Preparación (Aprestamiento)

N5 G90 G71 G40 G80 **G95** ; Condiciones iniciales
N10 **G28** U0 ; Condiciones Iniciales
N15 **G28** W0; Aproximación a 0 de Máquina
N20 **G92** X82 Z__ ; Referencia 0 de Pieza
N25 **G92** S3000; Velocidad máxima del husillo
N30 G00 X50 Z30; Alejarse de 0 de pieza
N35 **T0101**; Colocar herramienta 1
N40 M04 S1500 **G96** F0.4; Giro antihorario del husillo
avance 0.4 m/min

Ejecución (Cuerpo)

N45 G00 X_ Z_ ; Aproximación a la pieza
N50

:
:

Ciclo de Torneado longitudinal, Desbaste (F0.4)

N100 **G73** U_ R_ ; Profundizar U y retirarse R
N105 **G73** P110 Q180 U__ W__ ; Bloques del contorno sobre
material, definición
N110 geométrica del perfil
P__ (Línea donde inicia la descripción
del perfil)
Q__ (Línea donde finaliza la
descripción del perfil)

N180

N 185 G00 X50 Z50; Alejarse del material

N190 T0707; Buril de acabado

N195 M04 S1000 G96 F0.2

N200 **G72** P110 Q180; Ciclo de acabado (F0.3/0.2)

:
:

Cierre

N250 G00 X50 Z50; Alejarse de la pieza

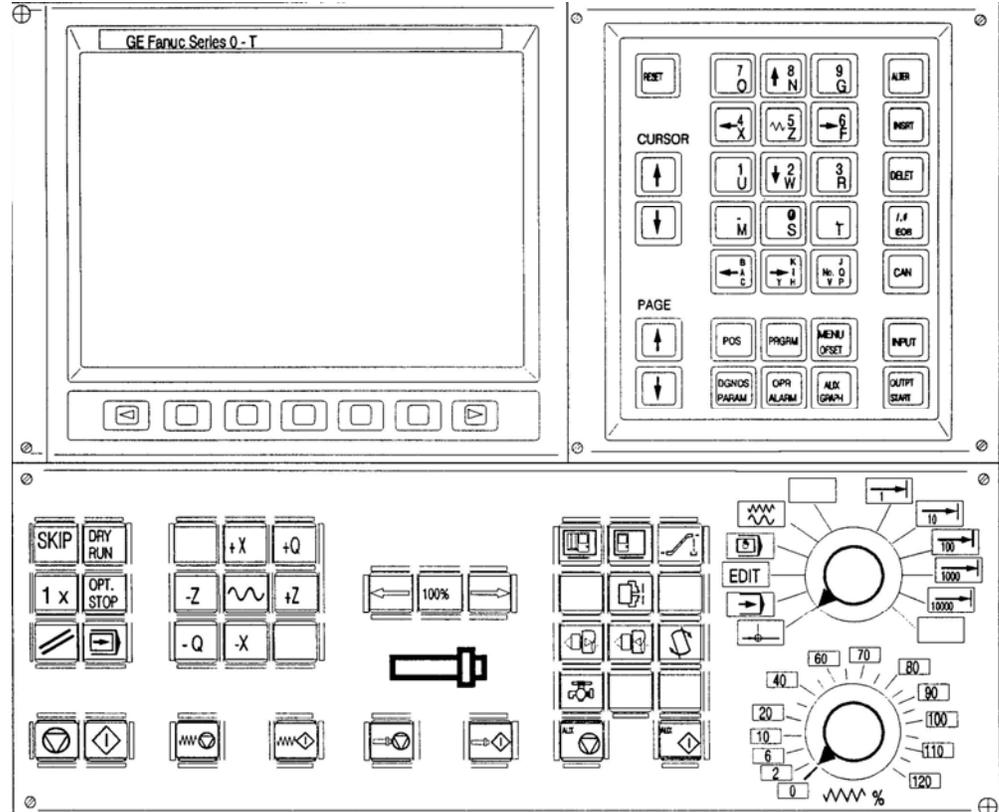
N255 T0101;

N260 M5;

N265 M2;

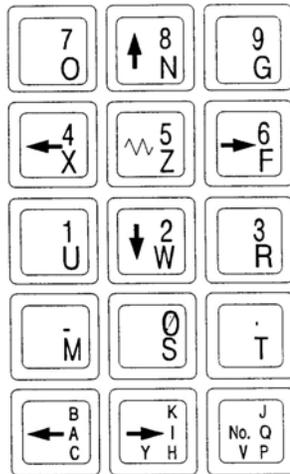
3.1.4 Operación de torno Emco control *Fanuc*

Descripción del panel de control:

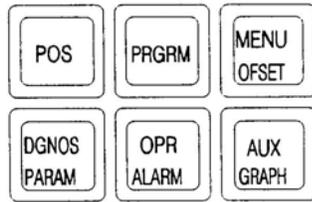


El tablero muestra las opciones de teclas para las diferentes funciones de la máquina así: de entrada de datos, de función, de operación de máquina, de funciones complementarias y de pantalla, además, las perillas de selección de operación y de control de cantidad de avance.

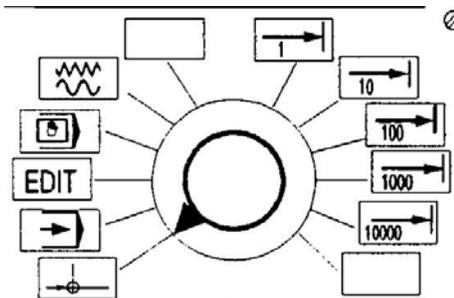
Teclado para entrada de datos: En el modo de edición y en modo manual permite la digitación para entrada, cancelación o modificación de datos en un programa. Al pulsar la primera tecla por primera vez, inserta las letras y en la segunda pulsación el número, esto para cada dato.



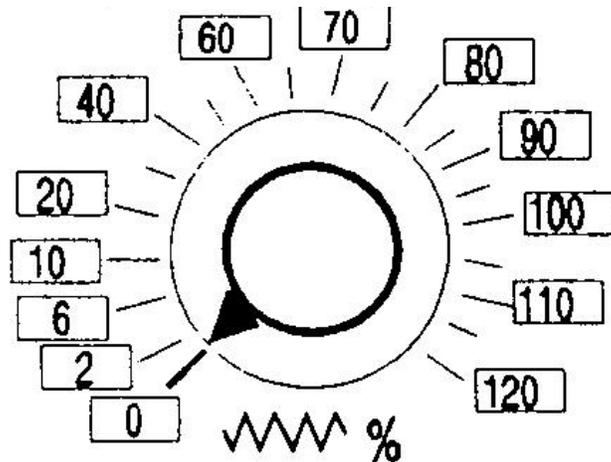
Teclado de operación del programa: este teclado permite determinar las siguientes funciones (de izquierda a derecha y de arriba hacia abajo) posicionamiento de cero pieza y cero máquina, ir a programa, datos de los referentes de la máquina como: herramientas, ubicación y parámetros, diagnóstico de parámetros, ver alarmas activas y graficador del programa.



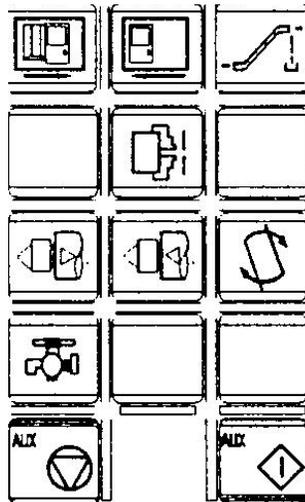
Perilla selectora de operaciones: con esta perilla se pueden seleccionar las diferentes operaciones que permite la máquina, en sentido horario: llevar a punto de referencia, correr programa en forma automática, edición, modo de operación manual de la máquina, desplazamiento continuo de los ejes de la máquina, desplazamiento en fracciones de 1mm, desplazamiento en fracciones de 10mm, desplazamiento en fracciones de 1000mm, desplazamiento en fracciones de 10000mm.



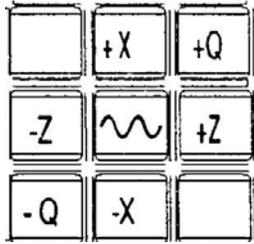
Perilla selectora de avance: permita la selección de la cantidad de avance en los diferentes ejes y se gradúa entre el rango del 0% al 120% del avance programado.



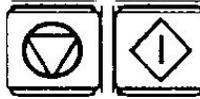
teclado de operación de la máquina: permite la manipulación de las funciones complementarias de la máquina, de izquierda a derecha y de arriba hacia abajo así: abrir puerta, cerrar puerta, desalojar material (función no activa en la máquina), abrir y cerrar mordazas del plato, retroceder cabezal móvil, avanzar cabezal móvil, giro manual de la torreta de herramientas, activar y desactivar refrigerante, desconectar grupos auxiliares y conectar grupos auxiliares.



Teclado para desplazamiento de los ejes: presenta los ejes de desplazamiento de la máquina tanto en sentido positivo como en negativo.



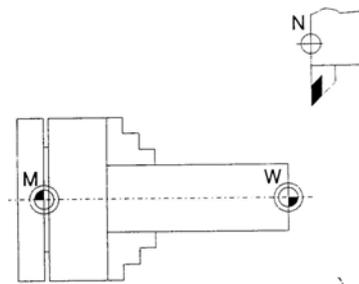
Teclado de potencia: muestra la tecla que permite el arranque o puesta en marcha del programa o de la función programada y la de detención de las mismas funciones.



3.1.5 Iniciación de la máquina:

Este procedimiento es obligatorio cada vez que se prende la máquina

- Libere la parada de emergencia (hale el botón rojo, en el tablero de control de la máquina)
- Abra la válvula de aire que viene de la acometida (debe estar contra la pared)
- Abra la válvula de aire y gire el pulsador de arranque (en el costado izquierdo de la máquina) Espere hasta que cargue el sistema.
- Al terminar la carga del sistema debe aparecer en pantalla una



primera alarma que indica “inicializar la puerta de la maquina.” Para inicializar la puerta pulse el botón que tiene la letra “T”, simultáneamente con el botón que indica abrir puerta, luego dejando pulsado el botón con la letra “T” pulse el botón que indica cerrar puerta. La alarma debe desaparecer de la pantalla.

- La segunda alarma en aparecer en pantalla es la de “conectar grupos auxiliares”. Pulse la tecla de color verde con las letras “AUX”, podrá escuchar cuando se energizan los motores. La alarma debe desaparecer de pantalla.
- La tercer alarma en aparecer en pantalla es “referenciar la máquina”. Para tal fin debe seleccionar la operación punto de referencia utilizando la perilla de operaciones y con la perilla de avance porcentual seleccione la velocidad que desea emplear en el proceso

de referenciado, luego pulse una de las teclas de desplazamiento en el eje X con "+X ó - X" y luego en el eje Z con "+Z ó - Z".

- Cuando la máquina se haya posicionado debe pulsar la tecla azul de introducción de datos "POS" y luego cuando en pantalla aparezcan las coordenadas seleccione "REL" con las teclas grises ubicadas inmediatamente debajo de la pantalla, las coordenadas deben aparecer como U y W (coordenadas relativas de X y Z) con valores.
- Pulse la tecla con la letra "U" y luego pulse la tecla "CAN" para colocar el valor en cero, las teclas se encuentran ubicadas en el tablero para introducción de datos. Repita la operación con la letra "W". En pantalla debe aparecer una nueva alarma.
- La cuarta y última alarma consiste en "plato abierto", para cerrarlo debe tener un pedazo de material colocado entre las mordazas, luego pulse la tecla con el icono del plato. La alarma desaparecerá de la pantalla.
- La máquina está lista para ser operada.

3.1.6 Digitar un programa:

Para Digitar o modificar un programa existente siga el siguiente procedimiento: Centre su atención en el tablero para introducción de datos.

- Seleccione, con la perilla de selección de operación, la opción *EDIT* en el panel de control.
- Seleccione *PROGRAM*, en pantalla debe aparecer el código correspondiente al último programa llamado.
- Con las teclas grises que se encuentran en la parte inferior de la pantalla, seleccione la opción *BIBLIO* correspondiente a la biblioteca que contiene todos los archivos de programa, en pantalla deberá aparecer ésta biblioteca.
- Seleccione un número de programa que no haya sido empleado (no use números superiores a 1000) Para nombrar el programa debe colocar la letra O seguida del número del programa así: "O12" si fuera 12 el número seleccionado e insértelo con la tecla *INSERT*, luego pulse la flecha ↓ correspondiente al cursor.
- El programa creado aparecerá en pantalla disponiendo la primera línea para introducir los datos.
- Introduzca los datos que corresponden a la línea uno por uno así: digite el código G90, por ejemplo, luego pulse *INSERT* y así con cada uno de los datos de la línea, sin embargo para insertar el último dato de la línea hágalo usando la tecla "EOB". Repita el proceso hasta digitar la totalidad de los datos.

Inconvenientes que puede tener al digitar el programa:

Si se equivoca al colocar un dato puede cambiarlo cuando lo ha insertado, para esto coloque el cursor al inicio del dato, digítelo nuevamente en forma correcta cámbielo con la tecla *ALTER* o coloque el cursor al inicio del dato y elimínelo con *DELET*, luego coloque el cursor al inicio del dato anterior e introduzca el nuevo dato digitándolo e insertándolo.

Si olvidó introducir datos coloque el cursor en el inicio del dato anterior al que va a introducir, digite el dato e insértelo.

Si olvidó una o varias líneas colóquese al final de la línea anterior a la olvidada, digite e inserte el número de la línea (este número debe estar comprendido entre los números de las líneas entre las que va a introducir la nueva línea (**N50 N51 N52 N53 N54 N55**), digite los datos correspondientes a la nueva línea.

Si insertó el último dato de la línea con la tecla *INSERT* y no saltó a la siguiente línea pulse la tecla *EOB* esta tecla sin dato previo corresponde al punto y coma (;) dé fin de línea y luego insértelo.

3.1.7 Simular un programa:

Al terminar de digitar el programa debe probarlo para verificar su correcto funcionamiento lógico.

- Posicione el cursor en el primer dato “_N5”.
- Pulse *AUX GRAPH* en el tablero de introducción de datos.
- En el teclado que se encuentra en la parte inferior de la pantalla seleccione *GRAPH*.
- Pulse la tecla de arranque o *start* que se encuentra ubicada en el tablero de control y espere a verificar la simulación.
- Si la simulación se detiene y la pantalla muestra error general de ciclo debe revisar en el ciclo de trabajo programado, es posible que haya equivocado un dato o presente un error de cálculo en una distancia, en un signo o en una magnitud; error de posición se debe a un dato de encabezado o de cierre que es desconocido para la máquina dimensionalmente; dato no encontrado indica que pudo colocar una letra o número que no guarda lógica con el proceso. Por ejemplo colocar M90 en lugar de G90.
- Pulse la tecla *PROGRAM* en el tablero de introducción de datos, haga los cambios y proceda de igual forma a la simulación hasta que no presente problemas.

3.1.8 Correr programa:

Para correr el programa o elaborar la pieza, se debe tener activo el programa correspondiente.

Si no está activo el programa coloque la perilla selectora de función en *EDIT*.

- Pulse la tecla *PROGRAM* del teclado de introducción de datos.
- En el teclado de la parte inferior de la pantalla seleccione *BIBLIO*, verifique que su programa se encuentra en memoria.
- Llame el programa digitando en la letra *O* seguida del número del programa deseado. Ejemplo *O16* y pulse la flecha del cursor hacia abajo. El programa debe aparecer en pantalla.
- Simule el programa para verificar que no ha sido alterado.
- Si todo es correcto abra la puerta y coloque el material en el que se elaborará la pieza y cierre nuevamente la puerta.
- Seleccione la operación modo de introducción manual de datos colocando la perilla en posición de la mano.
- Pulse la tecla *PROGRAM* e introduzca los datos necesarios para hacer girar el husillo del torno (*M4 + IMPUT*) + (*S1500 + IMPUT*), es decir que el husillo girará en contra de las manecillas del reloj con velocidad de 1500 R.P.M. Pulse la tecla *START*.
- Seleccione desplazamiento (el icono del *zig-zag*) con la perilla selectora de operación.
- Con la perilla selectora de cantidad de movimiento o avance seleccione la velocidad de desplazamiento deseado para la aproximación de la herramienta a la pieza (de 0% a 120%), esta perilla está ubicada en el tablero de control. Puede aproximarse a velocidad elevada pero cuando se encuentre aproximadamente a unos dos mm de la pieza reduzca el porcentaje de avance para no dañar la pieza ni la herramienta con un contacto brusco.
- Haga contacto en el material llevando la herramienta hasta el máximo diámetro del material y hasta el extremo próximo a la herramienta utilizando las teclas de “-X” y “-Z”, al ubicarla en este punto deje la herramienta en esta posición mientras gira el material.
- Revise las coordenadas relativas de la nueva posición (*POS + REL*), tome los valores absolutos para U y W que aparecen en pantalla en especial el de W.
- Retire un poco la herramienta de la pieza con las teclas “+X” y “+Z” aproximadamente 20mm o 30mm en cada eje.
- Seleccione la operación *EDIT* con la perilla selectora de operación y pulse *PROGRAM* en el tablero de introducción de datos.
- Ubique el cursor en la línea de datos “G92 X82 Z” al inicio de Z.

- Digite el valor tomado de la posición. Ejemplo “Z42.820” y altere pulsando *ALTER*.
- Lleve el cursor al inicio de la primera línea “_N5”.
- Seleccione automático colocando la perilla selectora de operación en la flecha → .
- Seleccione el porcentaje de avance apropiado con la perilla selectora de desplazamiento.
- Pulse la tecla de arranque.
- Si desea puede controlar manualmente el porcentaje de avance durante el proceso con la misma perilla selectora de movimiento porcentual.
- Al terminar la ejecución la máquina se detiene en la posición programada y la puerta se abrirá automáticamente para que retire la pieza terminada.
- En caso que la puerta quede bloqueada deberá operarla manualmente utilizando el pulsar con la letra “T” y las teclas de abrir y cerrar puerta en el tablero de control.

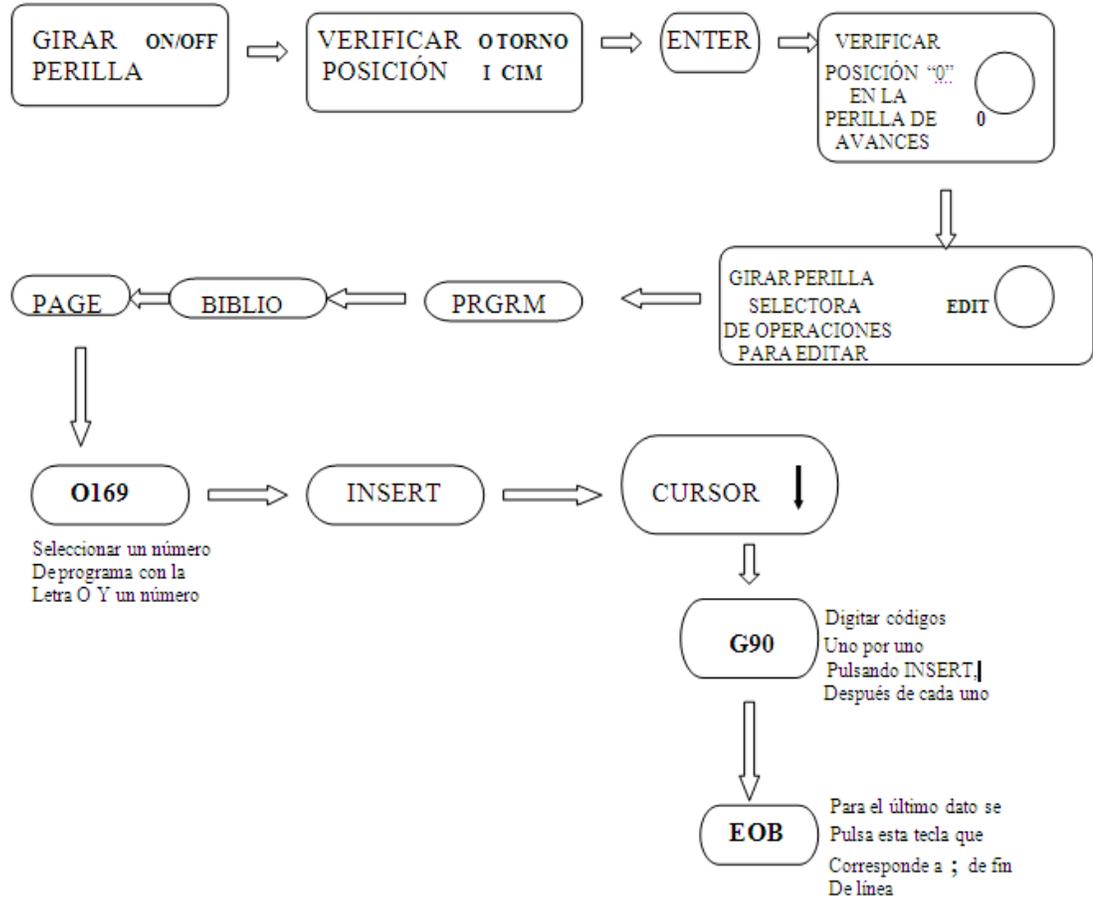
3.1.9 Apagar máquina:

Cuando haya terminado la sesión de trabajo retire el residuo de material y apague la máquina siguiendo el procedimiento.

- Gire totalmente a la izquierda las perillas selectora de operación y la selectora de avance porcentual.
- Oprima el pulsador de parada de emergencia.
- Cortar el fluido energético de la máquina girando el botón de encendido eléctrico en el costado izquierdo de la máquina y cerrando la válvula de corredera en el mismo costado, para cortar el paso de aire comprimido.
- Cierre la válvula que conecta la red neumática con el sistema de la máquina, esta está ubicada en la pared.

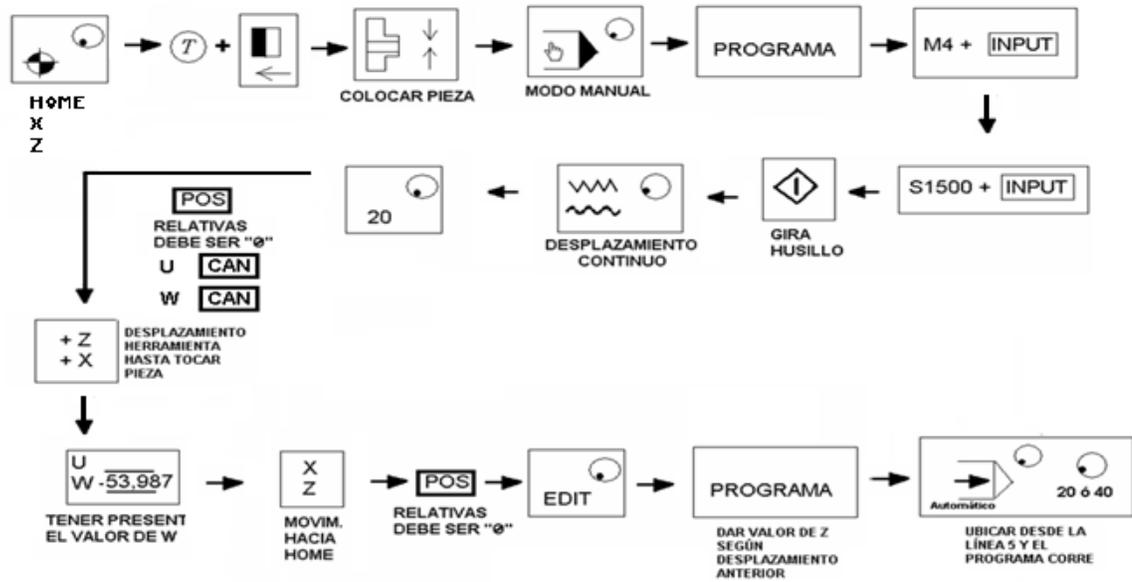
Anexo C

Figura 15: Edición de un programa en el torno Emco PC Turn 125



Fuente: Experto3

Figura 16: Flujograma Edición programa en el torno Emco PC Turn 125



Fuente: Experto3

Anexo D

Los datos que se utilizaron para el entrenamiento de la red neuronal, con los 3 materiales (Aluminio, Acero, Bronce), para el proceso de desbaste, se muestran en la Tabla 17.

Tabla 17: Datos de entrenamiento. Red Neuronal de Desbaste.

DATOS DE ENTRENAMIENTO				
MATERIAL*	VARIABLES DE ENTRADA			VARIABLE DE SALIDA
	AVANCE	P. CORTE	VEL. HUSILLO**	CALIDAD***
1	0,3	0,4	2	1
1	0,3	0,4	2,5	1
1	0,3	0,5	1,5	1
1	0,3	0,5	2	1
1	0,3	0,6	2	1
1	0,4	0,4	2	0,5
1	0,4	0,4	2,5	0,5
1	0,4	0,5	1,5	0,5
1	0,4	0,5	2	0,5
1	0,4	0,6	1,5	0,5
1	0,5	0,4	2,5	0
1	0,5	0,5	1,5	0
1	0,5	0,5	2	0
1	0,5	0,5	2,5	0
1	0,5	0,6	1,5	0
2	0,3	0,4	2	1
2	0,3	0,4	2,5	1
2	0,3	0,5	1,5	1
2	0,3	0,5	2	1
2	0,3	0,6	2	1
2	0,4	0,4	2	0,5
2	0,4	0,4	2,5	0,5
2	0,4	0,5	1,5	0,5
2	0,4	0,5	2	0,5
2	0,4	0,6	1,5	0,5
2	0,5	0,4	2,5	0
2	0,5	0,5	1,5	0
2	0,5	0,5	2	0
2	0,5	0,5	2,5	0
2	0,5	0,6	1,5	0
3	0,17	0,6	2	1
3	0,2	0,4	2	1
3	0,2	0,6	1,5	1
3	0,2	0,6	2	1
3	0,2	0,6	1,75	1
3	0,17	0,6	1,75	0,5
3	0,23	0,4	1,5	0,5
3	0,23	0,5	1,5	0,5
3	0,23	0,5	2	0,5
3	0,23	0,5	1,75	0,5
3	0,17	0,6	1,5	0
3	0,2	0,4	1,5	0
3	0,2	0,4	1,75	0
3	0,23	0,4	2	0
3	0,23	0,4	1,75	0

*Acero=1, Bronce=2, Aluminio=3

**La velocidad del husillo se dividió por 1000 para que los datos de todas las variables estuvieran dentro de un rango cercano (de 0 a 3)¹⁴

***Calidad: Alta = 1, Media = 0.5, Baja = 0.

¹⁴ Recomendación Experto 4.

Los datos que se utilizaron para probar la efectividad de la red luego de ser entrenada se muestran en la Tabla 18 y los resultados se muestran en la Gráfica 22.

Tabla 18: Datos de prueba. Red Neuronal de Desbaste.

DATOS DE PRUEBA				
VARIABLES DE ENTRADA				VARIABLE DE SALIDA
MATERIAL*	AVANCE	P. CORTE	VEL. HUSILLO**	CALIDAD***
1	0,3	0,4	1500	1
1	0,3	0,5	2500	1
1	0,3	0,6	2000	1
1	0,3	0,6	2500	1
1	0,4	0,4	1500	0,5
1	0,4	0,4	2000	0,5
1	0,4	0,4	2500	0,5
1	0,5	0,5	2000	0
1	0,5	0,5	2500	0
1	0,5	0,6	1500	0
1	0,5	0,6	2000	0
1	0,5	0,6	2500	0
2	0,3	0,4	1500	1
2	0,3	0,5	2500	1
2	0,3	0,6	2000	1
2	0,3	0,6	2500	1
2	0,4	0,4	1500	0,5
2	0,4	0,4	2000	0,5
2	0,4	0,4	2500	0,5
2	0,5	0,5	2000	0
2	0,5	0,5	2500	0
2	0,5	0,6	1500	0
2	0,5	0,6	2000	0
2	0,5	0,6	2500	0
3	0,2	0,5	1500	1
3	0,2	0,5	2000	1
3	0,2	0,5	1750	1
3	0,17	0,4	2000	0,5
3	0,17	0,4	1500	0
3	0,17	0,5	1750	0
3	0,2	0,5	1500	0,5
3	0,2	0,5	2000	0,5
3	0,2	0,5	1750	0,5
3	0,23	0,6	1500	1
3	0,23	0,6	2000	1
3	0,23	0,6	1750	1

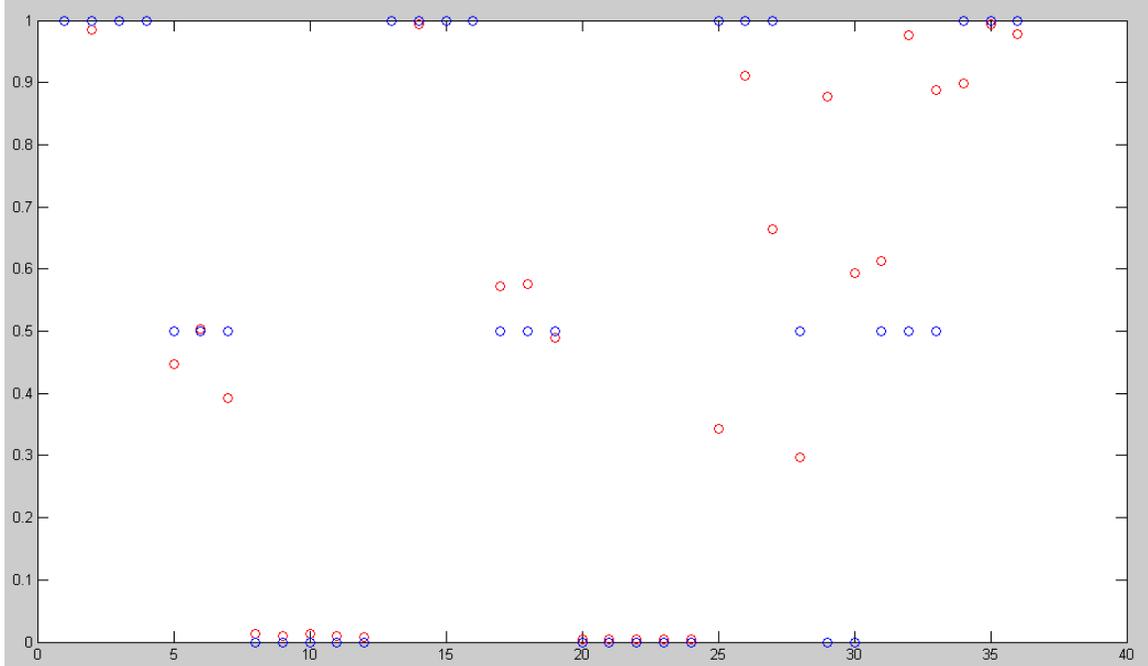
*Acero=1, Bronce=2, Aluminio=3

**La velocidad del husillo se dividió por 1000 para que los datos de todas las variables estuvieran dentro de un rango cercano (de 0 a 3)¹⁵

***Calidad: Alta = 1, Media = 0.5, Baja = 0.

¹⁵ Recomendación Experto 4.

Gráfica 22: Datos Predichos vs Datos Esperados. Bronce, Acero y Aluminio. Proceso de desbaste



*La coordenada del eje vertical muestra las calidades superficiales (de 0 a 1) y el eje horizontal muestra el número de pruebas que se realizaron.

La Gráfica 22 muestra el problema que tienen los datos del aluminio para entrenar la red. Se puede observar que los datos predichos, a partir del número 25, se separan de los datos esperados afectando la efectividad del algoritmo de la red.

Anexo E

Tabla 19: Datos de entrenamiento. Red Neuronal de Desbaste Acero y Bronce.

DATOS DE ENTRENAMIENTO				
VARIABLES DE ENTRADA				VARIABLE DE SALIDA
MATERIAL*	AVANCE	P. CORTE	VEL. HUSILLO**	CALIDAD***
2	0,3	0,5	2	1
2	0,4	0,5	1,5	0,5
2	0,4	0,6	1,5	0,5
2	0,5	0,6	1,5	0
1	0,3	0,6	2	1
2	0,5	0,5	1,5	0
1	0,5	0,5	1,5	0
1	0,3	0,4	2,5	1
2	0,3	0,4	2	1
1	0,5	0,5	2	0
2	0,4	0,4	2,5	0,5
2	0,5	0,5	2	0
1	0,4	0,5	2	0,5
1	0,3	0,5	1,5	1
1	0,5	0,6	1,5	0
2	0,4	0,4	2	0,5
1	0,4	0,5	1,5	0,5
2	0,3	0,5	1,5	1
1	0,4	0,4	2	0,5
2	0,4	0,5	2	0,5
1	0,4	0,4	2,5	0,5
2	0,5	0,4	2,5	0
1	0,3	0,5	2	1
2	0,3	0,4	2,5	1
1	0,5	0,5	2,5	0
2	0,3	0,6	2	1
2	0,5	0,5	2,5	0
1	0,4	0,6	1,5	0,5
1	0,3	0,4	2	1
1	0,5	0,4	2,5	0

*Acero=1, Bronce=2, Aluminio=3

**La velocidad del husillo se dividió por 1000 para que los datos de todas las variables estuvieran dentro de un rango cercano (de 0 a 3)¹⁶

***Calidad: Alta = 1, Media = 0.5, Baja = 0.

¹⁶ Recomendación Experto 4.

Tabla 20: Datos de prueba. Red Neuronal de Desbaste Acero y Bronce.

DATOS DE PRUEBA				
VARIABLES DE ENTRADA				VARIABLE DE SALIDA
MATERIAL*	AVANCE	P. CORTE	VEL. HUSILLO**	CALIDAD***
2	0,4	0,4	1,5	0,5
2	0,3	0,4	1,5	1
1	0,5	0,5	2,5	0
2	0,3	0,6	2	1
1	0,5	0,6	2	0
1	0,3	0,6	2,5	1
1	0,4	0,4	1,5	0,5
2	0,3	0,5	2,5	1
2	0,4	0,4	2	0,5
2	0,3	0,6	2,5	1
2	0,5	0,5	2	0
1	0,4	0,4	2	0,5
1	0,3	0,6	2	1
1	0,5	0,6	2,5	0
1	0,5	0,6	1,5	0
2	0,5	0,5	2,5	0
1	0,5	0,5	2	0
2	0,5	0,6	1,5	0
1	0,3	0,4	1,5	1
2	0,4	0,4	2,5	0,5
1	0,3	0,5	2,5	1
2	0,5	0,6	2	0
1	0,4	0,4	2,5	0,5
2	0,5	0,6	2,5	0

*Acero=1, Bronce=2, Aluminio=3

**La velocidad del husillo se dividió por 1000 para que los datos de todas las variables estuvieran dentro de un rango cercano (de 0 a 3)¹⁷

***Calidad: Alta = 1, Media = 0.5, Baja = 0.

¹⁷ Recomendación Experto 4.

Anexo F

Tabla 21: Datos de entrenamiento. Red Neuronal de Desbaste Aluminio.

DATOS DE ENTRENAMIENTO				
VARIABLES DE ENTRADA				VARIABLE DE SALIDA
MATERIAL *	AVANCE	P. CORTE	VEL. HUSILLO**	CALIDAD***
3	0,23	0,6	2	1
3	0,23	0,6	1,75	1
3	0,17	0,6	2	1
3	0,2	0,4	2	1
3	0,2	0,6	1,5	1
3	0,2	0,6	2	1
3	0,2	0,6	1,75	1
3	0,23	0,5	1,5	0,5
3	0,23	0,5	2	0,5
3	0,23	0,5	1,75	0,5
3	0,17	0,6	1,75	0,5
3	0,17	0,6	1,5	0
3	0,2	0,4	1,5	0
3	0,2	0,4	1,75	0
3	0,23	0,4	2	0
3	0,23	0,4	1,75	0

* Acero=1, Bronce=2, Aluminio=3

**La velocidad del husillo se dividió por 1000 para que los datos de todas las variables estuvieran dentro de un rango cercano (de 0 a 3)¹⁸

***Calidad: Alta = 1, Media = 0.5, Baja = 0.

¹⁸ Recomendación Experto 4.

Tabla 22: Datos de prueba. Red Neuronal de Desbaste Aluminio.

DATOS DE PRUEBA				
VARIABLES DE ENTRADA				VARIABLE DE SALIDA
MATERIAL*	AVANCE	P. CORTE	VEL. HUSILLO**	CALIDAD***
3	0,17	0,4	2	0,5
3	0,2	0,5	2	1
3	0,2	0,5	2	0,5
3	0,17	0,6	1,75	0,5
3	0,23	0,4	1,5	0,5
3	0,2	0,5	1,75	0,5
3	0,23	0,6	1,5	1
3	0,17	0,4	1,5	0
3	0,2	0,5	1,5	0,5
3	0,17	0,5	1,75	0
3	0,2	0,5	1,75	1

* Acero=1, Bronce=2, Aluminio=3

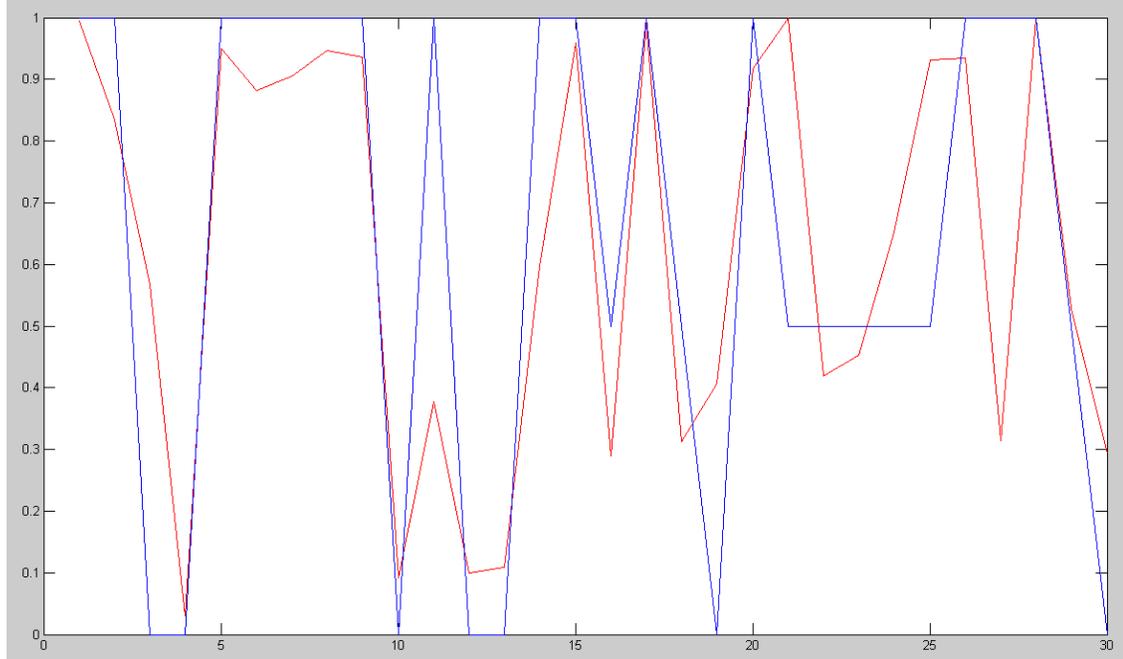
**La velocidad del husillo se dividió por 1000 para que los datos de todas las variables estuvieran dentro de un rango cercano (de 0 a 3)¹⁹

***Calidad: Alta = 1, Media = 0.5, Baja = 0.

¹⁹ Recomendación Experto 4.

Anexo G

Gráfica 23: Datos Predichos vs Datos Esperados. Bronce, Acero y Aluminio. Proceso de acabado



*La coordenada del eje vertical muestra las calidades superficiales (de 0 a 1) y el eje horizontal muestra el número de pruebas que se realizaron.

La Gráfica 23 muestra los resultados del entrenamiento de la red con los datos de bronce, aluminio y acabado en orden. En ésta se puede observar que ningún material tiene mejores condiciones para entrenar la red.

Anexo H

Tabla 23: Datos de entrenamiento. Red Neuronal de Acabado.

DATOS DE ENTRENAMIENTO				
VARIABLES DE ENTRADA				VARIABLE DE SALIDA
MATERIAL*	AVANCE	P. CORTE	VEL. HUSILLO**	CALIDAD***
2	0,035	0,2	2	1
1	0,025	0,2	3	0
2	0,025	0,2	2,5	0
1	0,025	0,1	2,5	0,5
3	0,06	0,2	3	1
3	0,05	0,3	2,5	0
3	0,05	0,2	3	1
1	0,03	0,3	3	1
2	0,03	0,3	2	0,5
1	0,035	0,1	2,5	1
1	0,03	0,2	2,5	0,5
3	0,07	0,1	3	0,5
3	0,07	0,2	1,5	0,5
1	0,035	0,1	3	0,5
1	0,03	0,1	2	0,5
3	0,05	0,1	3	0,5
1	0,035	0,1	2	1
3	0,06	0,1	2,5	1
1	0,025	0,1	2	1
2	0,03	0,2	3	0,5
2	0,03	0,3	2,5	0,5
1	0,035	0,3	2	1
1	0,03	0,2	3	0,5
3	0,06	0,3	2,5	0
1	0,025	0,3	2	0,5
3	0,07	0,3	3	0,5
2	0,035	0,3	3	1
2	0,025	0,3	3	0
1	0,035	0,3	3	1
2	0,035	0,1	2	1
3	0,07	0,3	2,5	0,5
1	0,03	0,3	2	1
2	0,03	0,2	2,5	0,5
1	0,03	0,2	2	0
3	0,07	0,2	2,5	1
3	0,07	0,1	2,5	1
2	0,035	0,1	2,5	1
2	0,025	0,3	2,5	0
2	0,03	0,1	2	0,5
1	0,035	0,2	3	1
1	0,03	0,1	2,5	1
2	0,025	0,1	2,5	0
1	0,035	0,3	2,5	1
2	0,025	0,3	2	0
3	0,07	0,3	1,5	0
2	0,03	0,3	3	0,5
3	0,05	0,3	3	0,5
2	0,035	0,3	2,5	1
2	0,035	0,2	2,5	1
3	0,06	0,2	2,5	1

* Acero=1, Bronce=2, Aluminio=3

**La velocidad del husillo se dividió por 1000 para que los datos de todas las variables estuvieran dentro de un rango cercano (de 0 a 3)²⁰

***Calidad: Alta = 1, Media = 0.5, Baja = 0.

²⁰ Recomendación Experto 4.

Tabla 24: Datos de entrenamiento. Red Neuronal de Acabado.

DATOS DE PRUEBA				
VARIABLES DE ENTRADA				VARIABLE DE SALIDA
MATERIAL*	AVANCE	P. CORTE	VEL. HUSILLO**	CALIDAD***
1	0,025	0,2	2,5	0,5
3	0,07	0,1	1,5	1
1	0,035	0,2	2,5	0,5
3	0,05	0,1	1,5	1
1	0,03	0,1	3	0
1	0,03	0,3	2,5	1
2	0,03	0,1	2,5	0,5
2	0,025	0,2	2	0
3	0,06	0,2	1,5	1
2	0,03	0,2	2	0,5
3	0,06	0,1	1,5	0,5
3	0,06	0,3	3	0
1	0,025	0,3	2,5	0,5
3	0,06	0,3	1,5	0
1	0,035	0,2	2	0,5
1	0,025	0,3	3	1
3	0,05	0,2	2,5	0,5
3	0,05	0,1	2,5	0,5
3	0,05	0,3	1,5	0
2	0,025	0,2	3	0
1	0,025	0,1	3	0
2	0,025	0,1	3	0
2	0,035	0,1	3	1
1	0,025	0,2	2	0
2	0,03	0,1	3	0,5
2	0,035	0,2	3	1
2	0,035	0,3	2	1
3	0,05	0,2	1,5	0,5
3	0,06	0,1	3	1
3	0,07	0,2	3	1
2	0,025	0,1	2	0

* Acero=1, Bronce=2, Aluminio=3

**La velocidad del husillo se dividió por 1000 para que los datos de todas las variables estuvieran dentro de un rango cercano (de 0 a 3)²¹

***Calidad: Alta = 1, Media = 0.5, Baja = 0.

²¹ Recomendación Experto 4.