



Hoja en blanco





# INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CD. CUAUHEMOC

División de Estudios de Posgrado e Investigación  
Maestría en Ingeniería

**“APLICACIÓN DE HERRAMIENTAS DE OPTIMIZACIÓN  
ESTADÍSTICA PARA MEJORAR EL TORNEADO DE UNA PIEZA DE  
ACERO”**

**TESIS**

Que para obtener el grado de:  
**Maestro en Ingeniería**

**SUSTENTA:**

**Juan de Dios Terrazas Márquez**  
**N. Control: G17610011**

**Director de Tesis:**  
**MC. Daniel Chapa Núñez**

**Cd. Cuauhtémoc Chih., Noviembre de 2019**



Oficio de aprobación



## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco profundamente a mi esposa, Zuleyka Mariela Maldonado Gil, quien, con su apoyo incondicional, sobre todo en los momentos difíciles, fue parte importante de esta etapa de mi vida. Su paciencia, consejo y ayuda, son motor para lograr la ansiada superación personal y profesional.

A mis asesores, gracias y reconocimientos, aportaron el mejor de los ejemplos de superación. Al Maestro Daniel Chapa Núñez, gracias por su dedicación y paciencia. No se puede calcular el valor del apoyo y conocimientos brindados en los últimos años.

Mi cordial agradecimiento a todos los docentes, reconozco su esmero en el día a día de esta noble labor de llevar conocimiento a los demás. Enseñar, es uno de los más grandes actos de amor hacia la humanidad, en cada día se deja parte del corazón para formar un mundo mejor.

Quiero agradecer al Instituto Tecnológico de Ciudad Cuauhtémoc y a todo su personal directivo y de apoyo; sin ellos el camino sería más complicado, aportaron medios necesarios para alcanzar la meta.

A Dios, gracias por permitirme llegar a la culminación de un episodio más de mi vida académica, agradezco estar en cada etapa de mi vida y permitirme salir adelante pese a las dificultades.

## **DEDICATORIA**

### **A mi amada esposa:**

Zuleyka, de tu perseverancia, fuerza y entusiasmo, tomé el ejemplo para salir adelante en todos los retos de la vida. Te dedico este trabajo por tu invaluable apoyo; no hubiera sido posible sin tu impulso para iniciar este proyecto y el respaldo para no desistir.

### **A mis hijas Damaris y Vanessa:**

Cada día que no estuve presente, cada momento que me perdí de su compañía, su gran comprensión a pesar de su corta edad, fue un sacrificio que hicieron para que su padre sea una mejor persona y profesionista. Gracias por entender que mi formación académica es para beneficio de nuestra familia.

### **A mis padres Juan de Dios Terrazas y Guadalupe Márquez**

Con mucho trabajo y amor sembraron en mí la semilla de la perseverancia como principal herramienta para lograr mis objetivos. El amor de padre y madre, su ejemplo de esfuerzo, el trabajar sin descanso, formaron en mí una mejor persona. Los llevo siempre en mi pensamiento y corazón y esperando que estén orgullosos de su hijo.

## RESUMEN

El maquinado de piezas es un proceso complejo que involucra muchas variables que afectan determinantemente en los resultados deseados. La vibración de la herramienta de corte es uno de los fenómenos que mayormente afectan en precisión dimensional de los componentes maquinados. En esta investigación se aplican herramientas avanzadas de optimización estadística, con el objetivo de estudiar el efecto de las variables de operación: velocidad de corte, avance y paso, en el maquinado de una pieza de acero al carbón en un torno CNC. Para su análisis se utilizan los métodos estadísticos de relaciones señal-ruido de acuerdo al Método Taguchi, análisis de varianza y regresión. Se lleva a cabo un diseño experimental utilizando un arreglo ortogonal L-18 en un centro de torneado. La variable de respuesta estudiada es la amplitud de la vibración en las direcciones axial y tangencial bajo diferentes criterios de desempeño. Mediante el análisis de varianza, se determina la significancia y porcentaje de contribución de cada una de las variables de operación bajo estudio. Se optimizó el proceso respecto a los parámetros de operación y los resultados se validaron utilizando como variables de respuesta el acabado superficial y las vibraciones axial y tangencial.

**Palabras claves:** vibración, herramienta de corte, optimización estadística, vibración axial y tangencial, acabado superficial

## ABSTRACT

The machining of parts is a complex process that involves many variables that decisively influences the desired results. The vibration of the cutting tool is one of the phenomena that mostly influences the dimensional accuracy of the machined components. In this research, advanced statistical optimization tools are applied, with the objective of studying the effect of the operation variables: cutting speed, feed rate and pitch, in the machining of a piece of carbon steel in a CNC lathe. Statistical methods of signal-to-noise, variance analysis, and regression are used to analyze data. An experimental design is carried out using an orthogonal arrangement L-18 in a turning center. The response variable studied is the amplitude of the vibration in the axial and tangential directions under different performance criteria. By means of the analysis of variance, the significance and contribution percentage of each one of the operation variables under study is determined. The process was optimized with respect to the operating parameters and the results were validated using surface finish and axial and tangential vibrations as response variables.

**Keywords:** vibration, cutting tool, statistical optimization, axial, tangential, surface finish.

## CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	i
DEDICATORIA	ii
RESUMEN	iii
ABSTRACT	iv
INDICE DE TABLAS	vii
INDICE DE FIGURAS	viii
GLOSARIO DE TÉRMINOS	ix
1.- INTRODUCCIÓN	1
2.- PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	4
2.1 Antecedentes	4
2.2 Definición del Problema	5
2.3 Preguntas de Investigación	6
2.4 Objetivos	6
2.5 Hipótesis	7
2.6 Justificación	7
2.7 Limitaciones y Supuestos	11
3.- REVISION DE LIETERATURA	12
3.1. Antecedentes de la Investigación	12
3.2. Estrategia Seis Sigma	14
3.3. Modelado y Optimización del mecanizado con el uso de métodos estadísticos.	18
3.3.1. Método de diseño factorial.	20
3.3.2. Método de Taguchi.	25
3.3.3. Metodología de superficie de respuesta. (RSM: reponse Surface methodology).	30
3.3.4. Análisis de la varianza.	36
3.3.5. Métodos de regresión estadística.	39
3.4. Introducción a los procesos de manufactura.	43
3.4.1. Los materiales en la manufactura.	46
3.4.2. Operaciones que se realizan en un proceso de manufactura.	47
3.4.3. Materiales en la Ingeniería, metales y sus aleaciones.	50
3.4.4. Sistemas de producción y planeación de procesos.	53
4.-METODOLOGIA	57
4.1. Diseño de Investigación (o Nivel de la Investigación)	57
4.2. Operacionalización de variables. Relación y Conceptualización.	59
4.2.1. Definición Conceptual.	59
4.2.2. Definición Operacional.	60

4.3. Población y Muestra.	62
4.4. Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos, validez y confiabilidad	62
4.5. Métodos de análisis de datos.	63
4.6. Aspectos éticos.	63
4.7. Desarrollo de la tesis.	64
<b>5.-RESULTADOS Y OBTENIDOS</b>	<b>69</b>
5.1. Descripción de Factores, Niveles y Arreglo Ortogonal Utilizado.	69
5.2. Análisis de los Datos con Relaciones Señal/Ruido y ANOVA	71
5.3. Análisis de Regresión y Superficie de Respuesta	76
5.4. Discusión de Resultados.	81
<b>6.-CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>83</b>
<b>7.-BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>85</b>
<b>8.- APÉNDICE</b>	<b>91</b>
<b>9.- ANEXO</b>	<b>110</b>

## INDICE DE TABLAS

Tabla 3.1	Diseño factorial $2^3$ con niveles del factor representados por - 1 y 1	23
Tabla 3.2	Diseño factorial $2^3$ con niveles del factor representados por (-) y (+)	24
Tabla 3.3	Arreglo Ortogonal de Taguchi L9	26
Tabla 3.4	Arreglo Ortogonal de Taguchi L9	27
Tabla 3.5	Diseño compuesto centrado. Experimento con dos factores.	33
Tabla 3.6	Parámetros de diseño Box-Behnken en un diseño de tres factores	35
Tabla 3.7	Tabla típica de un análisis de varianza ANOVA	38
Tabla 5.1	Valores y factores de control utilizados	69
Tabla 5.2	Arreglo ortogonal, factores y niveles	70
Tabla 5.3	Resultados obtenidos para el arreglo L18 ( $2^1 3^4$ )	70
Tabla 5.4	Modelo de regresión para superficie de respuesta	77

## INDICE DE FIGURAS

Figura 3.1	Objetivo del cambio hacia seis sigma	16
Figura 3.2	Ciclo DMAIC. Utilizado en seis sigma	17
Figura 3.3	Puntos de prueba de un diseño factorial $2^2$	21
Figura 3.4	Ejemplo de un diseño compuesto centrado de dos factores	32
Figura 3.5	Esquema de puntos en un diseño de Box-Behnken	34
Figura 3.6	Distribución F en varios casos, con diferentes grados de libertad en el numerador y en el denominador	37
Figura 3.7	Ejemplo de la distribución weibull	41
Figura 3.8	Ejemplo de un proceso de manufactura clásico	44
Figura 3.9	Ejemplo de un proceso de fundición y moldeo	48
Figura 3.10	Ejemplo de un proceso de metalurgia de polvos	48
Figura 3.11	Ejemplo de un proceso de deformación comunes. (a) Forjado, y (b) extrusión	49
Figura 3.12	Ejemplo de operaciones comunes de maquinado (a) Torneado; (b) taladrado y (c) fresado	49
Figura 4.1	Esquema de experimento y variable	58
Figura 4.2	Diseño de preprueba-posprueba con un solo grupo	58
Figura 5.1	Gráficas de efectos principales para medias y S/R en vibración axial	71
Figura 5.2	Porcentaje de contribución de los factores experimentos	72
Figura 5.3	Efectos principales para S/R en vibración tangencial	72
Figura 5.4	Efectos principales para S/R en cuanto a rugosidad	73
Figura 5.5	Gráfica de optimización múltiple para las variables de respuesta	74
Figura 5.6	Gráfica de ANOVA y gráfica de residuos para vibración tangencial	75
Figura 5.7	Gráfica de respuesta a la velocidad tangencial y gráfica de contorno velocidad versus material	76
Figura 5.8	Gráficas de efectos principales	78
Figura 5.9	Superficies de respuesta	79
Figura 5.10	Gráfica de parámetros optimizados por superficie de respuesta	80

## GLOSARIO DE TÉRMINOS

<b>Análisis de la causa raíz</b>		Variación del diagrama Causa-Efecto. Cada una de las causas potenciales que han sido identificadas pueden ser potencialmente examinadas de un modo más detallado preguntando para cada una de las causas: quién, qué, dónde, cuándo, por qué.
<b>MANUFACTURA ESBELTA</b>		Herramientas que ayudarán a eliminar operaciones que no agregan valor al producto, servicio y a los procesos.
<b>Formato Control SPM SIM</b>	<b>de</b>	Documentación necesaria de un proyecto para la elaboración de la auditoria de la fase de control. Método estándar de producción Método estándar de inspección

## **CAPITULO 1.-INTRODUCCION.**

El maquinado de piezas es un proceso complejo que involucra varias variables que pueden influir determinantemente en los resultados deseados. Entre ellos encontramos, la vibración de la herramienta de corte que es uno de los fenómenos que mayormente influyen en la precisión dimensional de los componentes maquinados, así como el comportamiento funcional de la máquina y la vida de la herramienta de corte. En un proceso de maquinado de piezas los factores que más influyen en la vibración de la herramienta de corte son la velocidad de corte, el paso y avance de la herramienta.

El corte de metales, específicamente el acero, es un proceso industrial muy importante utilizado en los países económicamente desarrollados en todo tipo de industrias manufactureras como la automotriz, aeronáutica, electrodomésticos, materiales para la construcción. Hernández, L.W., (2011). La revisión de literatura nos muestra que no se han realizado estudios serios para investigar el efecto de la vibración debida a la herramienta de corte de las direcciones tangencial y axial respectivamente en el maquinado de piezas de acero en tornos CNC.

El propósito del maquinado de diferentes materiales y condiciones de operación es lograr piezas de alta calidad como por ejemplo en el acabo superficial. De aquí que sea esencial el control de todos los parámetros de operación durante el torneado de piezas de acero con unas durezas variables. El problema aquí consiste, en investigar mediante métodos estadísticos de señal ruido (S/R), análisis de varianza (ANOVA) y análisis de regresión, una operación de maquinado en torno como se menciona anteriormente, tomando en cuenta factores como velocidad de corte, profundidad y avance, tipo de buril y tipo de material, midiendo su influencia en el acabado superficial de la pieza y la vibración de la herramienta de corte en las direcciones axial y tangencial.

En esta investigación se aplican herramientas avanzadas de optimización estadística, con el propósito de estudiar el efecto de las variables de operación: velocidad de corte, avance y paso, en el maquinado de una pieza de acero al carbón en un torno CNC, donde se estudian la vibración originada en el proceso en las direcciones axial y tangencial. Se lleva a cabo un diseño experimental utilizando un arreglo ortogonal L-18 en un centro de torneado, se eligió una pieza de acero al carbón como unidad experimental para ser maquinada en el experimento. A partir de los resultados experimentales, se utiliza como variable de respuesta la amplitud de la vibración de la herramienta de corte, bajo diferentes criterios de desempeño. Mediante el análisis de varianza, ANOVA se determina la significancia y porcentaje de contribución de cada uno de los parámetros o variables de operación bajo estudio.

El objetivo de esta investigación es Optimizar los parámetros de corte en el proceso de manufactura de una pieza en base a material de acero 1045, 1018 y 4140 en un torno CNC utilizando métodos estadísticos de relación señal ruido (S/R), análisis de varianza (ANOVA) y regresión estadística, para mejorar el acabado superficial midiendo la vibración axial y tangencial de la herramienta de corte. Por lo que es necesario monitorear el nivel de vibración en la herramienta de corte e investigar los efectos de los parámetros de maquinado en la herramienta de corte para luego realizar un análisis de vibración recolectando datos de vibración y determinando así, que parámetros pueden ser optimizados empleando un arreglo ortogonal de Taguchi. También el análisis de varianza es importante para determinar la significancia de los parámetros de corte. Finalmente se realiza una corrida confirmatoria utilizando las condiciones óptimas de operación. La aplicación de estas metodologías en los procesos de maquinado nos permitirá mejorar los procesos, mediante el establecimiento de métodos, aumentando la productividad y con la menor cantidad de recursos empleados, para así poder generar mayor valor agregado.

El contenido de esta tesis está estructurado de la siguiente manera: En el capítulo uno se presenta la introducción; en el segundo se presenta la descripción del problema a resolver; el capítulo tres hace cuenta de la revisión bibliográfica donde se presenta el origen y definición de Seis sigma y DMAIC; así mismo el capítulo cuatro muestra la metodología empleada para resolver el problema; luego en el quinto muestra de manera detallada todos los resultados obtenidos; y finalmente el sexto hace relatoría de los hallazgos y conclusiones obtenidas del estudio realizado.

## **CAPITULO 2.- PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.**

### **2.1.- Antecedentes.**

La mejora continua de los procesos de manufactura es fundamental para llegar a nivel óptimos de productividad, calidad y costo en la fabricación de componentes y productos.

La demanda de componentes mecánicos de alta calidad y gran exactitud en sistemas de alto desempeño ha aumentado considerablemente en los últimos 20 años a nivel mundial. Este hecho ha provocado el desarrollo de nuevas tecnologías aplicadas a los procesos de corte Martínez, F., Sánchez, T., Frías, G. y Pinilla, A. (2006). Por ello es necesario disponer de modelos que relacionen de forma precisa las variables que intervienen en un proceso de corte en torno.

El desarrollo integral de las máquinas y herramientas de corte, controles, husillos de alta velocidad, nuevos materiales para los substratos y capas, tecnología de maquinado, etc., posibilita la aplicación del corte con altas velocidades.

El aumento de la velocidad de corte es una forma de aumentar la eficiencia de un proceso de manufactura a través de la reducción del tiempo de fabricación, pero además hay que tomar en cuenta varios parámetros de maquinado que forman parte del proceso, así como también los fenómenos físicos que se presentan durante el proceso de manufactura como es el caso de la vibración, herramientas de corte, secuencia de fabricación y en el método.

Abhang, L.B. and Hameedullah M. (2012)., han intentado estudiar el efecto de tres parámetros diferentes, a saber, la velocidad de alimentación, la profundidad de corte y la temperatura del lubricante, mientras que se produce acero EN-31 con insertos de carburo de tungsteno. Fornasier M. and Trelat E. (2014)., han investigado el efecto de los parámetros de corte: Velocidad de corte, Velocidad de avance, Profundidad de corte y fracción de peso igual combinada de partículas de SiC-Gr en el torneado de compuestos híbridos de Al-SiC-Gr.

Patel et al. (2014), ha informado a través de una revisión sobre los parámetros que influyen en la tasa de remoción del material, el consumo de energía y la rugosidad de la superficie de los aceros EN-19 en la operación de torneado utilizando el método de Taguchi. Mukherjee S., Kamala A. and Kumar K. (2016)., ha realizado un estudio para optimizar la tasa de eliminación de material durante el torneado del SAE1020 con herramienta de corte de carburo.

El corte de metales, específicamente el acero, es un proceso industrial muy importante utilizado en los países económicamente desarrollados en todo tipo de industrias manufactureras como la automotriz, aeronáutica, electrodomésticos, materiales para la construcción. Hernández, L.W. (2011). Para la optimización de procesos existen diferentes estrategias como las de tecnología, materiales, procesos, investigación de operaciones, inteligencia artificial (robótica, algoritmos genéticos, lógica difusa, redes neuronales).

En este caso se observa muy factible determinar en la práctica todos aquellos factores de utilidad económica y de operación, utilizando optimización estadística, como es la aplicación de diseños experimentales clásicos, metodología Taguchi, análisis de varianza (ANOVA) y análisis de regresión.

## **2.2.-Definición del Problema**

El propósito del maquinado de diferentes materiales y condiciones de operación es lograr piezas de alta calidad como por ejemplo en el acabado superficial. De aquí que sea esencial el control de todos los parámetros de operación durante el torneado de piezas de acero con dureza variables. El problema aquí consiste, en investigar mediante métodos estadísticos de señal ruido (S/R), análisis de varianza (ANOVA) y análisis de regresión, una operación de maquinado en torno como se menciona anteriormente, tomando en cuenta factores como velocidad de corte, profundidad y avance, tipo de buril y tipo de material, midiendo su influencia en el

acabado superficial de la pieza y la vibración de la herramienta de corte en las direcciones axial y tangencial.

Existen muchas metodologías de ingeniería para resolver problemas en las áreas de manufactura y calidad. Por mencionar algunas tenemos el kaizen, 5W-1H, mejora continua, seis sigma, método Juran, método Deming (PDCA), 8D, la filosofía de Ackoff, entre muchas otras, tanto administrativas, filosóficas, matemáticas y de ingeniería. En este caso específico de nuestro problema de investigación, consideramos que lo más apropiado es utilizar herramientas avanzadas de optimización estadística, como alternativa de solución y mejora continua.

### **2.3.- Preguntas de Investigación**

1.- ¿De qué manera, la aplicación de la metodología optimización estadística influye para mejorar la calidad en el acabado superficial en el maquinado de piezas de acero al carbón?

2.- ¿Es posible optimizar los parámetros de corte en el proceso de manufactura de una pieza en base a material de acero al carbón en un torno CNC utilizando métodos estadísticos de relación señal ruido (S/R), análisis de varianza (ANOVA) y regresión estadística, para mejorar el acabado superficial midiendo la vibración axial y tangencial de la herramienta de corte?

### **2.4 Objetivo**

Optimizar los parámetros de corte en el proceso de manufactura de una pieza en base a material de acero 1045, 1018 y 4140 en torno CNC utilizando métodos estadísticos de relación señal ruido (S/R), análisis de varianza (ANOVA) y regresión

estadística, para mejorar el acabado superficial midiendo la vibración axial y tangencial de la herramienta de corte.

## **2.5 Hipótesis**

Midiendo la vibración axial y tangencial de la herramienta de corte, y utilizando optimización estadística es posible determinar los factores y niveles óptimos de los parámetros de manufactura en una operación de torno CNC lo cual se manifiesta en un mejor acabado superficial.

## **2.6 Justificación**

La mejora de un proceso representa un reto para las industrias, éstas invierten una cantidad importante de capital con ese fin. Los destinos de esos recursos se orientan a la compra de nueva maquinaria, a la capacitación del personal, al esfuerzo por alcanzar estándares de calidad más competitivos. Sin embargo, destinan poco dinero al desarrollo de tecnología. La mejora continua es una transformación mediante ella se alcanza la excelencia. En el contexto de una empresa la mejora se debe dar en todos los campos, en particular los que involucran a los procesos de manufactura y productos, tal que esto redunde en una mejora de la calidad de los bienes y servicios.

Específicamente, hay dos clases de mejora de la calidad. Una de ellas es mediante el avance tecnológico, la otra mediante la mejora en todo el proceso productivo. En la fase de mejora, es conveniente concentrarse en algunas circunstancias del proceso, y no dispersar esfuerzos. Si tecnológicamente no se puede mejorar, la única forma de mejorar el producto es mediante un sistema de mejora continua. Siempre hay que intentar mejorar los resultados. Lo que lleva aparejada una dinámica continua de estudio, análisis, experiencias y soluciones en procesos, cuyo

propio dinamismo tiene como consecuencia un proceso de mejora continua de la satisfacción del cliente. Pedro, S.S., Gabriel, B.U., Elizabeth, A,G.,(2014).

La optimización estadística se plantea desde un esquema experimental con el fin de establecer las mejores condiciones en un proceso para mejorar las características de un producto. La función de despliegue de la calidad es la estrategia para conocer las expectativas del cliente y las habilidades operativas en un proceso. Las aplicaciones que se hacen de este procedimiento generalmente se quedan en el planteamiento, es necesario llegar a conocer el punto óptimo de los atributos del cliente, ante esta situación se aplican técnicas estadísticas de optimización. En propuestas recientes se plantea la necesidad de construir modelos que relacionen las condiciones técnicas del proceso con los intereses del cliente y a partir de ahí establecer un modelo de optimización.

La estadística y sus diversos métodos, son una herramienta que sirve para mejorar la calidad de los procesos, productos y servicios, dando mayor rentabilidad y crecimiento al negocio. Esta metodología puede ser usada en todas las áreas que componen la organización y no solamente a un departamento específico como el de calidad. La bibliografía es demasiado compleja y el lenguaje en algunos casos resulta difícil de entender, por los términos y conceptos de estadística que se usan. Por lo anteriormente expuesto, este trabajo mostrará la aplicación de la metodología en un proyecto de mejora real. Las empresas, parecen haber encontrado su nuevo credo: el de la calidad total.

Las empresas que se limitaban a realizar el control a posteriori de su única calidad presentaron la disolución organizacional una tras otra. Si las empresas de hoy quieren sobrevivir deberán trabajar para sus clientes más que para sí mismas apoyadas en una metodología que les permita llevar a cabo esta transición.

Son diferentes los motivos, pero más que nada se debe a la llegada de una economía globalizada; la irrupción de competidores nuevos en el juego económico mundial hace caducar a las empresas no competitivas y obliga a todas aquellas que

quieran sobrevivir a apoyar de ahora en adelante su actividad fundamentada en una vigilancia meticulosa, atenta y permanente del mercado, para ajustar siempre mejor la calidad de la respuesta que se requiere.

Para sobrevivir, los productores deben conocer perfectamente cuáles son las necesidades de los clientes, tanto actuales como potenciales, y ser capaces de traducir esas necesidades a especificaciones de los productos y servicios y, en última instancia a los procesos productivos. Para la aplicación de la optimización estadística de la calidad en procesos de manufactura, se tiene la premisa de que, parte de los beneficios consisten en la reducción de más del 50% en los costos del proceso, mejora en el tiempo de ejecución, abatimiento del desperdicio de materiales, un mejor entendimiento de los requisitos de los clientes, incremento en su satisfacción y mayor confiabilidad en sus productos y servicios.

Ante las circunstancias descritas, diversas empresas se han visto en la necesidad imperiosa de realizar un cambio total en su manera de gestionar las empresas, dando lugar esto a la optimización estadística de la calidad en procesos de manufactura, tanto como herramienta para el diseño o para la mejora de procesos, siendo esto una inversión extraordinariamente rentable; entendida y practicada como herramienta de gestión integral de la empresa, constituye una de las más prometedoras opciones de que disponemos, en el difícil camino sin fin hacia la excelencia.

**Conveniencia.** La aplicación de esta metodología de optimización estadística permite mejorar los procesos mediante el establecimiento de métodos, aumentando la productividad y con la menor cantidad de recursos empleados, para así poder generar mayor valor agregado.

**Relevancia Social.** Disponer de una metodología de optimización estadística que, mediante sus herramientas nos permite reducir la variabilidad de los procesos, y a la vez, encontrar los defectos y mejorarlos, obteniendo beneficios y de tal modo poder reducir las barreras que limitan el flujo continuo de los procesos.

**Implicancias Prácticas.** La metodología de optimización estadística se enfoca en la reducción de defectos y la variabilidad de sus procesos asegurando la calidad en sus procesos. Asimismo, cabe resaltar que este procedimiento utiliza diversas herramientas y métodos para llevar a cabo su aplicación tales como: el diagrama causa y efecto, gráfica de Pareto, etc. Cabe resaltar que la aplicación de esta metodología se centra en ahorrar costos de no calidad, eliminar desperdicios y reducir errores, para el cual se basa en la recolección de datos para poder aplicar una verdadera optimización de procesos.

**Justificación Económica.** La presente tesis tiene un impacto económico bajo, debido a que la aplicación de la metodología no implica un gasto ya que no altera los estados financieros. De este modo, se reduce los costos de no calidad y optimización de tiempos en los ciclos productivos, por ende, la metodología de optimización estadística genera un aumento de la rentabilidad en la empresa.

## 2.7 Limitaciones y Supuestos

Los resultados y conclusiones derivados de este estudio son válidas únicamente en el proceso de maquinado de piezas al carbón en torno tipo CNC, marca DYNA MECH, modelo DM 3300 que existe en el Instituto Tecnológico de Cuauhtémoc, pudiendo hacerse inferencia a otros equipos CNC la institución donde sea factible aplicar la metodología de optimización estadística. Prácticamente no existen restricciones para su aplicación, excepto las mentales y aquellas que no requieren compromiso con la persona y con la voluntad de ser.

Este Caso de Estudio servirá como base de consulta a aquellas personas que tienen la responsabilidad de resolver problemas de calidad y realizar proyectos de mejora, basándose en metodologías de optimización estadística de la calidad en procesos de manufactura, logrando con esto la mejora de los procedimientos de producción de bienes y servicios, enfocándose a garantizar la satisfacción del cliente, y además de que está alineado a la estrategia de negocio, ya que está dirigido a los procesos clave de negocio.

## **CAPITULO 3.- REVISION DE LIETERATURA**

### **3.1. Antecedentes de la Investigación**

El corte de metales es un proceso de manufactura fundamental y ampliamente utilizado en la industria de manufactura e ingeniería. Principalmente tiene que ver con las características de la herramienta, con los tipos de material de la pieza de trabajo y con los parámetros de maquinado y su ajuste, que influyen en la eficiencia del proceso y en las características de calidad obtenidas. Este proceso puede tener un crecimiento muy significativo en cuanto a eficiencia, si se optimizan los parámetros del proceso, buscando y encontrando regiones críticas de las variables de operación que nos lleven a obtener las respuestas de salida deseadas del proceso, con una variación mínima aceptable y asegurando el menor costo de manufactura posible.

Las condiciones de operación en corte incluyen velocidad de corte, flujo de refrigerante, profundidad y paso. Para un proceso de maquinado como en el caso de torneado de piezas, la vibración es problema común que afecta la calidad del maquinado principalmente en el acabado superficial y en el tiempo de vida de la herramienta, el movimiento dinámico entre la herramienta de corte y la pieza de trabajo provocan severas vibraciones en el proceso de maquinado. El monitoreo de los procesos de manufactura y las condiciones de operación del equipo son un aspecto crucial y táctico que impulsa a las industrias de manufactura, hacer más esbeltas y competitivas. Frankowiak M., Grosvenor R., and Prickett P., (2005).

Para el monitoreo de las condiciones de operación en el maquinado se utilizan diferentes sensores; sensores de potencial, sensores de vibración, sensores ópticos, sensores de temperatura, sensores táctiles, sensores de fuerza, de emisión acústica, de flujo y muchos más. Dimla D.E., (2000).

La función de los sensores y su capacidad para interpretar señales es crítica en automatización de procesos. La investigación y el procesamiento de señales es muy

importante debido a que mejoran muchos la capacidad de producción y la confiabilidad, reduciendo el tiempo muerto y elevan la calidad de maquinado. Ghasempoor y Byrne nos dicen que el 46% de los sensores en sistemas de monitoreo son totalmente funcionales, 16% poseen una funcionalidad limitada, 25% de ellos no son funcionales o tienen limitaciones técnicas y el 13% restante deben ser sustituidos por dejar de funcionar en el sistema. Los sistemas de monitoreo basados en sensores son la mejor elección para predecir las condiciones de una herramienta de corte.

Los elementos recíprocos y/o rotacionales que son parte de una máquina provocan vibraciones de diferentes amplitudes. Las herramientas de corte probablemente son los que más se deterioran en su desempeño respecto al tiempo (vida útil) debido a varios factores tales como el envejecimiento, el desbalance, uso y desgaste, pérdida de partes, etc., dando como resultado un incremento en los niveles generales de vibración. Las vibraciones no controladas de la herramienta de corte pueden afectar adversamente las dimensiones y la precisión, vida útil y acabado superficial. Un incremento en los niveles de vibración puede contribuir hasta en un 70% de las fallas en el instrumental de la máquina. El torno es una máquina de las más críticas en las industrias de manufactura. La calidad de la pieza de trabajo está relacionada directamente con la condición del torno. Es muy difícil aprovechar de manera óptima las funciones de una máquina que posee una gran cantidad de parámetros que pueden ser ajustados durante el maquinado. Aminollah M., Alireza F., Ehsan E., Davoud K. (2008). La dinámica utilizada en los diseños experimentales de Taguchi es un método sistemático y eficiente para encontrar los ajustes óptimos en parámetros de maquinado. Mahapatra y Patnaik (2007) y Aminollah (2008). El análisis de varianza (ANOVA) es una herramienta extensivamente utilizada para estudiar como los efectos o factores afectan a una variable de respuesta.

En los estudios experimentales el ANOVA es generalmente utilizado previo a cualquier otro análisis estadístico, y posteriormente se utiliza el análisis de regresión

para encontrar o descubrir la relación que existe entre variables independientes y de respuesta, como lo menciona Phadke (1989).

Abhang y Hameedullah (2012)., han intentado estudiar el efecto de tres parámetros diferentes, a saber, la velocidad de alimentación, la profundidad de corte y la temperatura del lubricante, mientras que produce acero EN-31 con insertos de carburo de tungsteno. Fornasier et al. (2014)., ha investigado el efecto de los parámetros de corte: Velocidad, Velocidad de avance, Profundidad y fracción de peso igual combinada de partículas de SiC-Gr en el torneado de compuestos híbridos de Al-SiC-Gr. Patel et al. (2014)., ha informado a través de una revisión sobre los parámetros que influyen en la tasa de remoción del material, el consumo de energía y la rugosidad de la superficie de los aceros EN-19 en la operación de torneado utilizando el método de Taguchi. Mukherjee, S.N., Basu S.K. (2014)., ha realizado un estudio para optimizar la tasa de eliminación de material durante el torneado del SAE1020 con herramienta de corte de carburo en un torno CNC Turn-105 utilizando la técnica de Taguchi.

### **3.2.- Estrategia Seis Sigma.**

El concepto Seis Sigma se ha extendido hasta convertirse en una verdadera filosofía de gestión global de la empresa. Este último punto se comprende fácilmente si pretendemos hacer compatibles aspectos tan exigentes y aparentemente contradictorios como la total satisfacción del cliente, los niveles de calidad  $6\sigma$  y los propios resultados de la empresa que le permitan sobrevivir en el mercado. Seis Sigma nos ofrece la solución al paradigma actual de la calidad y de la excelencia en la gestión: cómo mejorar la calidad y la satisfacción del cliente y, simultáneamente, reducir los costos de producción. Seis Sigma tiene tres niveles de implantación: táctico, estratégico y cultural.

El nivel táctico consiste en el análisis científico de un proceso de producción con el fin de optimizarlo, tanto desde el punto de vista de sus resultados en términos de calidad como de los costos asociados.

El nivel estratégico es donde se conjuga la orientación al cliente con el conocimiento de los procesos clave del negocio, se trata de determinar perfectamente cuáles son las características de un producto que resultan críticas para el cliente y que, en definitiva, condicionarán la satisfacción de éste. En términos prácticos puede decirse que un proceso de producción tiene un nivel de calidad  $6\sigma$  cuando a largo plazo presenta poco más de 3 DPMO (defectos por millón de oportunidades), como se muestra en la figura 3.1.

La principal meta del Seis Sigma es reducir defectos, errores y fallas a un valor próximo a cero. ¿Por qué reducir la variación, defectos, errores y fallas a un valor tendiendo a cero? Porque con esto se obtiene la satisfacción del cliente, los clientes satisfechos continúan comprando productos y/o servicios. Clientes satisfechos normalmente cuentan a sus amigos cuán satisfechos están con un producto o servicio. Más clientes insatisfechos normalmente cuentan para todo el mundo, amigos o extraños, el nivel de su insatisfacción.

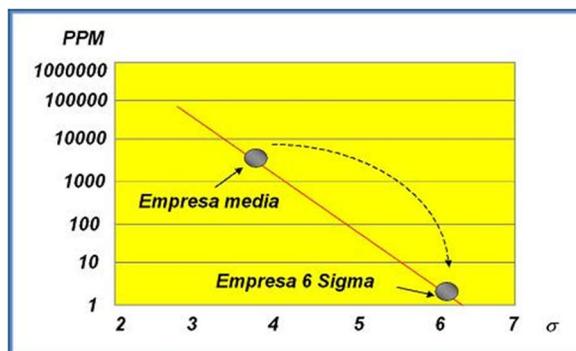


Figura 3.1.-Objetivo del cambio hacia seis sigma.

Se ha desarrollado como sistema para la resolución de problemas el método DMAMC (Definir-Medir-Analizar-Mejorar-Controlar). Este método es llevado a la práctica por grupos especialmente formados a los efectos de dar solución a los diversos problemas u objetivos de la compañía.

**Definir el problema:** ¿Debe definirse claramente en que problema se ha de trabajar?, porqué se trabaja en ese problema en particular?, ¿quién es el cliente?, ¿cuáles son los requerimientos del cliente?, ¿cómo se lleva a cabo el trabajo en la actualidad?, ¿cuáles son los beneficios de realizar una mejora? Siempre debe tenerse en cuenta que definir correctamente un problema implica tener un 50% de su solución. Un problema mal definido llevará a desarrollar soluciones para falsos problemas.

**Medir.** El medir persigue dos objetivos fundamentales:

1. Tomar datos para validar y cuantificar el problema o la oportunidad. Esta es una información crítica para refinar y completar el desarrollo del plan de mejora.
2. Nos permiten y facilitan identificar las causas reales del problema.

El conocimiento de estadística se hace fundamental. “La calidad no se mejora, a no ser que se la mida”.

**Analizar.** El análisis nos permite descubrir la causa raíz. Para ello se hará uso de las distintas herramientas de gestión de la calidad. Como son las siete herramientas estadísticas clásicas y las nuevas siete herramientas. Las herramientas de análisis deben emplearse para determinar dónde estamos, no para justificar los errores. El Diagrama de Pareto es a los efectos de darle prioridad a los factores que mayor importancia tienen en la generación de fallos o errores, pero no debe significar dejar de atender las demás causas. Al respecto Crosby señala que “a los numerosos pero triviales ni siguiera les hacen caso; les dejan que envenenen el producto o servicio para el consumidor

**Mejorar.** En esta etapa asume una preponderancia fundamental la participación de todos los participantes del proceso, como así también la capacidad creativa, entre los cuales se encuentran el uso de nuevas herramientas como el Pensamiento Lateral y la Programación Neuro Lingüística (PNL). La fase de mejora implica tanto el diseño como la implementación.

**Controlar:** Es necesario confirmar los resultados de las mejoras realizadas. Debe por tanto definirse claramente unos indicadores que permitan visualizar la evolución del proyecto. Los indicadores son necesarios pues no podemos basar nuestras decisiones en la simple intuición. Los indicadores nos mostrarán los puntos problemáticos de nuestro negocio y nos ayudarán a caracterizar, comprender y confirmar nuestros procesos. Mediante el control de resultados lograremos saber si estamos cubriendo las necesidades y expectativas de nuestros clientes.

La Definición de un proyecto de mejora consiste en seleccionar aquel proceso cuya mejora tendrá el mayor impacto positivo en las características del producto que resulten críticas para la calidad, las determinadas CTQ (“Critical-to-Quality”), según las ha definido el cliente. Pieza clave en esta etapa es la herramienta denominada QFD o despliegue de la función de calidad.

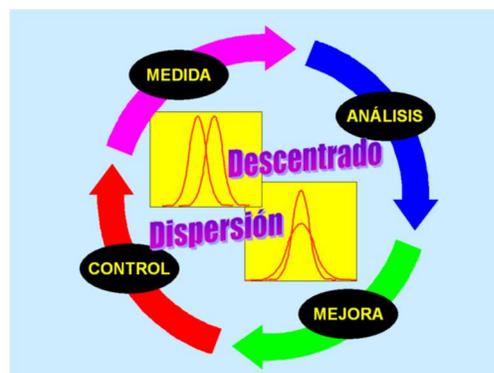


Figura 3.2.-Ciclo DMAIC utilizado en seis sigma.

Herramientas se utilizan en el sistema seis sigma. Por un lado, se tienen las herramientas destinadas a la generación de ideas y organización de la información.

Entre ellas podemos mencionar: la tormenta de ideas, diagrama de afinidad, estructura en árbol, mapa de proceso a primer nivel, diagrama de flujo de proceso y diagramas de causa-efecto (espina de pez). En cuanto a las herramientas para la obtención de datos tenemos: el muestreo estadístico, DVC (métodos para obtener la voz del cliente), hojas y gráficos de control, análisis del sistema de medida.

Luego tenemos las herramientas para el análisis estadístico (por ejemplo, diseños experimentales o modelos de regresión), y las herramientas para la implementación y gestión de los procesos. Entre éstas últimas herramientas se encuentran: los Métodos de Gestión de Proyectos, el Análisis de Problemas Potenciales, el Análisis del Modo de Fallo y sus Efectos (AMFE), Análisis de los grupos afectados, Diagramas de Campo de Fuerzas, entre otros.

En resumen, se podría decir que tolerar errores no garantiza la satisfacción de todos los clientes. El movimiento seis sigma es como el regreso de la calidad a sus orígenes con un fuerte soporte en las estadística, en la observación y análisis de la variabilidad. Thomas P., Paul K., (2010).

### **3.3.- Modelado y optimización del mecanizado con el uso de métodos estadísticos.**

A continuación, haremos referencia al uso de métodos estadísticos y técnicas de computación flexible que se pueden usar en el modelado y la optimización de procesos de mecanizado. Más específicamente, el método de diseño factorial, el método de Taguchi, la metodología de superficie de respuesta (RSM), el análisis de varianza y los métodos de regresión estadística.

Como parte del diseño de experimentos (DOE), los métodos y técnicas antes mencionadas han demostrado ser herramientas muy potentes y confiables. Especialmente en el mecanizado, ya se han publicado una gran cantidad de trabajos

que indican la importancia de estos métodos. Por ejemplo, la aplicación de diseño de experimentos para mejorar del proceso de soldadura en el armado de autos.

Un modelo se puede definir como un sistema abstracto, equivalente al sistema real que representa con respecto a sus propiedades y características. Se puede usar para cálculos, análisis y predicciones que de otro modo serían costosas o en algunos casos imposibles de llevar a cabo. El proceso de optimización se define generalmente como un proceso o metodología para hacer algo tan perfecto, funcional o efectivo como sea posible.

Específicamente, en la práctica de ingeniería común, la optimización implica un procedimiento matemático adecuado que puede proporcionar, a través de una forma ordenada, el conjunto óptimo de características que se relacionan con el rendimiento óptimo de un sistema. Más específicamente, un problema de optimización consiste en una función, llamada función objetivo que describe el objetivo del proceso que debe minimizarse o maximizarse; un conjunto de variables de entrada denominadas variables de diseño, cuya combinación óptima es necesaria y un conjunto de restricciones que pueden estar relacionadas con la configuración del problema y sus características físicas. Luego, utilizando algoritmos adecuados, se busca en el área de posibles soluciones para determinar la región cuando el punto óptimo se encuentra en una forma ordenada y eficiente. Esencialmente utilizando métodos de optimización, el problema matemático de optimización, que consiste en encontrar los puntos extremos de una función, se transforma en un procedimiento numérico y considerando la gran cantidad de potencia computacional disponible hoy en día, se crea una poderosa herramienta para muchas aplicaciones.

Vale la pena señalar que, en los problemas de ingeniería de la vida real, la evaluación de cada conjunto de posibles soluciones es mucho más difícil que en los casos de la optimización de las funciones matemáticas. Específicamente, puede involucrar el modelado numérico y la simulación de un proceso y su duración puede variar de segundos a horas en problemas muy exigentes. Por lo tanto, el

procedimiento de optimización debe ser capaz de determinar el óptimo con la menor cantidad posible de iteraciones para que sea eficiente y termine dentro de un período de tiempo razonable. Los procesos de mecanizado son ejemplos de sistemas complicados en los que el modelado y la optimización ya han encontrado aplicaciones extendidas como se menciona en Rao (2011). En los siguientes párrafos, se presentan los métodos de computación estadística más utilizados para modelar y optimizar los procesos de mecanizado.

### **3.3.1.- Método de diseño factorial.**

El método de diseño factorial es una familia general de métodos estadísticos, empleados para el diseño de un experimento científico. Cuando se realiza un experimento utilizando el método de diseño factorial, se puede investigar con éxito el efecto de varios factores en una o más variables de respuesta. Cada factor generalmente se considera como una variable independiente y se estudia en varias subdivisiones o niveles discretos, a saber, valores discretos que se encuentran dentro de un rango predefinido, apropiado para cada experimento. En los primeros trabajos, la importancia y la eficacia de la realización de experimentos complejos de múltiples factores se consideraron importantes y se establecieron las bases para los métodos de diseño factorial. Fisher (1935), fue el primero en introducir el término "factorial" en su trabajo.

Comúnmente, los métodos de diseño factorial se clasifican en diseños factoriales completos y factoriales fraccionados. Usando un diseño factorial completo, el experimento se lleva a cabo asumiendo las combinaciones de cada factor con todos los otros factores en todos los niveles.

Así, en estos casos se realizan todos los experimentos posibles. Por lo general, se consideran dos o tres niveles para cada factor y el diseño factorial se nombra después del número de factores según el número de niveles para cada factor, por

ejemplo. Un diseño factorial de  $2 \times 2$  o  $2^2$ . Una notación similar se emplea en casos con factores con diferentes números de niveles, por ejemplo,  $3^5 \times 2$  denota que hay 5 factores con 3 niveles cada uno y un factor con 2 niveles, es decir, un total de  $3^5 \times 2 = 486$  experimentos. Sin embargo, es evidente que un diseño de este tipo puede fácilmente conducir a una cantidad inviable de experimentos a realizar, lo que resulta en una cantidad considerablemente grande de trabajo o un costo adicional.

Por el contrario, el diseño factorial fraccional implica un cierto subconjunto o fracción del número total de ejecuciones experimentales que se producirían como resultado de un diseño factorial completo. Este subconjunto se elige cuidadosamente utilizando los procesos estadísticos adecuados para estudiar un subconjunto del problema original que contiene la mayor cantidad de información posible sobre el proceso. Cuando se hace referencia al diseño factorial fraccional, se emplea una notación relevante para el diseño factorial completo. Por ejemplo, un diseño  $2^{4-2}$  significa que solo se llevará a cabo el  $\frac{1}{4}$  de los  $2^4 = 16$  experimentos originalmente requeridos. En la Figura 3.3 se presenta un esquema de los puntos de prueba en un diseño  $2^2$ .

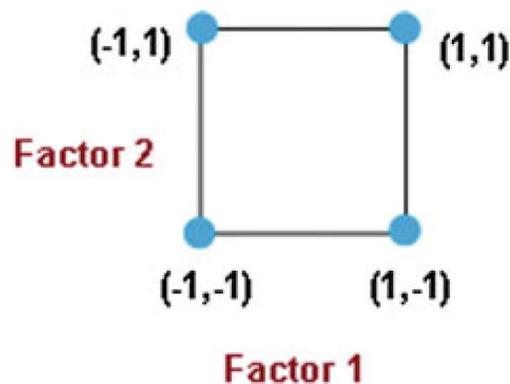


Figura 3.3.- Puntos de prueba de un diseño factorial  $2^2$  .

Además de las dos categorías principales, otros tipos de diseños multifactoriales son: diseños de bloques al azar (RBD), diseños de Plackett-Burman, diseños de Taguchi y diseños relacionados con la metodología de superficie de respuesta

(RSM). En cuanto a todas las familias de métodos DOE, hay una cantidad considerable de trabajo teórico relacionado con los fundamentos matemáticos del método de diseño factorial. El lector, que está interesado en los fundamentos matemáticos del DOE, debe considerar estudiar la literatura relevante como se puede hallar en Montgomery D..C. (2019). y Tsao H.S.J, Patel M.H. (2015).

Los diseños factoriales tienen características comunes cuando se aplican al diseño experimental. El primer paso fundamental consiste en la elección de los factores y sus niveles. Este paso no debe ser subestimado en ningún caso, ya que depende tanto de la comprensión teórica de los parámetros del problema como de la experiencia en problemas similares. Luego, se requiere la selección de las variables de respuesta adecuadas, que pueden proporcionar información adecuada sobre el proceso. Esta selección, sin embargo, depende del equipo existente de cada laboratorio y del nivel de dificultad para la conducción de las mediciones.

Cuando se realizan las elecciones fundamentales para el experimento, se hace la elección de los detalles del diseño experimental. El número de ejecuciones requeridas para cada esquema de diseño debe tomarse en serio, así como los niveles reales de cada factor. A menudo es preferible utilizar un pequeño número de niveles, por ejemplo, dos, cuando no se requiere un estudio a fondo. Una vez completada la elección del esquema de diseño experimental y los detalles, se produce la matriz que describe los parámetros utilizados en cada ejecución. Es una práctica común codificar los valores reales de los factores experimentales a niveles denotados como  $-1$  y  $1$ , como también se puede ver en la Figura 3.3 o con los signos “+” y “-”. Los ejemplos de diseños factoriales que utilizan ambas notaciones se presentan en las Tablas 3.1 y 3.2 para el caso de un diseño factorial completo de  $2^3$ , es decir, 3 factores a 2 niveles cada uno.

El siguiente paso es la conducción del experimento de acuerdo con el conjunto definido de ejecuciones. Es importante monitorear el proceso durante todas las etapas, ya que los errores en esta etapa producen resultados irrelevantes y cancelan las ventajas ofrecidas por el método de diseño experimental con respecto

a la validez científica del experimento. Si el experimento se lleva a cabo con éxito, el análisis estadístico de los resultados puede proporcionar una forma sólida para determinar el efecto de cada factor en la respuesta o el efecto de la interacción entre varios factores y si los resultados son afectados por errores experimentales. Utilizando el método de diseño factorial, la primera etapa del análisis comprende gráficos de respuesta como histogramas, gráficos de caja, etc. y gráficos de efectos principales e interacción con el fin de visualizar el resultado experimental y evaluar las características de los hallazgos básicos. Luego, se pueden emplear modelos de regresión para determinar la relación entre los diversos factores experimentales y estadísticos.

Tabla 3.1.- Diseño factorial  $2^3$  con niveles del factor representados por -1 y 1.

<b>Experimento</b>	<b>Factor 1</b>	<b>Factor 2</b>	<b>Factor 3</b>
<b>1</b>	<b>1</b>	<b>-1</b>	<b>-1</b>
<b>2</b>	<b>1</b>	<b>-1</b>	<b>1</b>
<b>3</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>
<b>4</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>-1</b>
<b>5</b>	<b>-1</b>	<b>-1</b>	<b>-1</b>
<b>6</b>	<b>-1</b>	<b>-1</b>	<b>1</b>
<b>7</b>	<b>-1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>
<b>8</b>	<b>-1</b>	<b>1</b>	<b>-1</b>

Tabla 3.2.- Diseño factorial  $2^3$  con niveles de factor representados por (-) y (+).

Experimento	Factor 1	Factor 2	Factor 3
1	+	-	-
2	+	-	+
3	+	+	+
4	+	+	-
5	-	-	-
6	-	-	+
7	-	+	+
8	-	+	-

Los métodos de análisis como el análisis de varianza (ANOVA) se pueden aplicar para un análisis más detallado de los resultados. Además, después de realizar el análisis de los resultados, se pueden aplicar métodos de computación suave y optimización a los resultados experimentales para crear modelos que describan el comportamiento de un sistema estudiado e investigar su desempeño en varios rangos de parámetros operativos.

Por lo general, el diseño experimental que utiliza diseños factoriales se lleva a cabo utilizando un software estadístico y experimental adecuado, como Minitab, SPSS y otros. Estos paquetes de software proporcionan a los usuarios una guía suficiente sobre la conducción de todo el proceso y son altamente confiables.

**Aplicaciones del Método de Diseño Factorial en Mecanizado.** Existen numerosos ejemplos de aplicaciones del método de diseño factorial en experimentos científicos. Específicamente en experimentos de mecanizado, una amplia gama de procesos se diseña utilizando un diseño factorial. Estudios en general sobre mecanizado como, fresado, taladrado, mecanizado asistido por láser, mecanizado por electro descarga (EDM), mecanizado ultrasónico, y mecanizado por chorro de agua abrasivo se han realizado utilizando estos esquemas de diseño. Qehaja N. Jakupi K. Bunjaku A. Bruçi M, Osmani H. (2015)., Yang Y.K. Chuang M.T, Lin S.S. (2009)., Nithyanandam G.K., Pezhinkattil R. (2014).

### **3.3.2.- Método de Taguchi.**

El método Taguchi es uno de los métodos DOE empleados con más frecuencia. Esencialmente, esta categoría de métodos DOE se puede considerar como una categoría especial de diseños factoriales fraccionarios. Si bien los métodos de Taguchi se derivan de diseños factoriales, su desarrollo introdujo varios conceptos nuevos en el diseño y evaluación de experimentos, que brindan una valiosa ayuda tanto para aplicaciones científicas como industriales. Al igual que con los otros diseños factoriales fraccionados, el Taguchi.

El método se desarrolló para superar la gran cantidad de experimentos asociados con diseños multifactoriales y factoriales completos. La reducción de la cantidad de experimentos requeridos para un estudio generalmente se realiza ignorando algunas de las interacciones entre los parámetros del problema, una suposición también empleada en los diseños de Plackett-Burman. El método de Taguchi se emplea a menudo como un proceso de optimización, en el que los factores estudiados en el experimento también se usan como variables de diseño para la optimización de un sistema o un proceso.

Los métodos de Taguchi permiten una guía estricta y una metodología bien definida para la determinación de la elección de un subconjunto suficiente del número total de experimentos que se realizarán utilizando el método factorial completo. Utilizando el método de Taguchi, se crean matrices ortogonales y se emplean para reducir significativamente el número de experimentos, incluso cuando se estudia un gran número de variables.

Los diseños de Taguchi se pueden realizar en dos o más niveles para cada factor e incluso es posible elegir configuraciones mixtas. Una vez que se selecciona la matriz ortogonal de Taguchi, los experimentos se llevan a cabo utilizando una secuencia aleatoria.

**Descripción del Método.** El método de diseño de Taguchi se puede aplicar en ciertos pasos distintos, similar a los otros métodos de diseño experimental. Después de seleccionar cuidadosamente las variables independientes del experimento, es decir, los factores, se debe determinar la selección del número apropiado de niveles para cada factor. Esta es una parte crucial del método de Taguchi, ya que está relacionada con el tipo de matriz ortogonal y determina el número de ejecuciones experimentales. Ejemplos de dos casos de diferentes arreglos ortogonales, a saber, el arreglo ortogonal L9 y el arreglo ortogonal L27, se pueden ver en las Tablas 3.3 y 3.4.

Tabla 3.3.- Arreglo Ortogonal de Taguchi L9.

No. De Experimento	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 4
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

El siguiente paso consiste en la codificación de los valores reales de cada nivel de factor asignándoles un valor específico tal como: -1, 0 y 1 que representa el nivel mínimo, central y máximo de un factor, respectivamente. Cuando estos pasos se completan, el experimento puede tener lugar. Una vez que los experimentos se llevan a cabo de forma ordenada, se realiza el análisis de los datos de los resultados experimentales. Tradicionalmente, el método de Taguchi emplea el cálculo de la relación “**señal/ruido**” (relación **S/R**), como un medio para determinar el efecto de cada factor en la salida final del proceso.

Tabla 3.4.- Arreglo Ortogonal de Taguchi L9.

No.	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10	F11	F12	F13
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2
3	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3
4	1	2	2	2	1	1	1	2	2	2	3	3	3
5	1	2	2	2	2	2	2	3	3	3	1	1	1
6	1	2	2	2	3	3	3	1	1	1	2	2	2
7	1	3	3	3	1	1	1	3	3	3	2	2	2
8	1	3	3	3	2	2	2	1	1	1	3	3	3
9	1	3	3	3	3	3	3	2	2	2	1	1	1
10	2	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
11	2	1	2	3	2	3	1	2	3	1	2	3	1
12	2	1	2	3	3	1	2	3	1	2	3	1	2
13	2	2	3	1	1	2	3	2	3	1	3	1	2
14	2	2	3	1	2	3	1	3	1	2	1	2	3
15	2	2	3	1	3	1	2	1	2	3	2	3	1
16	2	3	1	2	1	2	3	3	1	2	2	3	1
17	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3	3	1	2
18	2	3	1	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3
19	3	1	3	2	1	3	2	1	3	2	1	3	2
20	3	1	3	2	2	1	3	2	1	3	2	1	3
21	3	1	3	2	3	2	1	3	2	1	3	2	1
22	3	2	1	3	1	3	2	2	1	3	3	2	1
23	3	2	1	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2
24	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2	2	1	3
25	3	3	2	1	1	3	2	3	2	1	2	1	3
26	3	3	2	1	2	1	3	1	3	2	3	2	1
27	3	3	2	1	3	2	1	2	1	3	1	3	2

La relación S/R está asociada con uno de los objetivos básicos del método de Taguchi, la reducción de la variabilidad al minimizar el efecto inducido por los factores de ruido en el experimento y generalmente se define de la siguiente manera:

$$SNR = \frac{\mu}{\sigma}$$

Donde  $\mu$  es la media de la señal o el valor esperado y  $\sigma$  es la desviación estándar del ruido. En algunos casos, la relación S/ R se puede definir como el cuadrado de la fracción anterior. Más específicamente, utilizando el método de Taguchi, los métodos de optimización se pueden clasificar en dos grupos distintos: los problemas estáticos y dinámicos. Los problemas estáticos están relacionados con la determinación de los mejores niveles de factor de control para un proceso de modo que la salida tenga un valor deseado, mientras que los problemas dinámicos involucran la determinación de los mejores niveles de factor de control para que la relación de una señal de entrada y su salida es el más cercano a un valor deseado. En problemas estáticos, el factor de señal (entrada) tiene un valor fijo, mientras que en los problemas dinámicos se requiere una relación entre la señal de entrada y salida.

En el caso de problemas estáticos, la relación S/R se puede definir de tres formas diferentes según el objetivo de optimización del proceso en el estudio. Más específicamente, estas relaciones se definen de la siguiente manera:

**1.- Más pequeño, mejor (abreviado como STB: Smaller-the-better o  $SN_s$ ):**

$$n = -10 \log \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right)$$

Donde la cantidad dentro del símbolo de suma representa la media de la suma de cuadrados de los datos medidos. Esta relación se suele emplear cuando el valor de la característica "ruidosa" debería tener idealmente un valor de cero o cuando el valor deseado se define como una diferencia entre el valor actual y el óptimo.

**2.- Más grande, mejor (abreviado como LTB: Larger-the-better):**

$$n = -10 \log \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right)$$

### 3.- Nominal es lo mejor (NTB Nominal-the-best):

$$n = 10 \log \left( \frac{\mu^2}{\sigma} \right)$$

Esta relación se emplea a menudo cuando el valor deseado no aparece en una expresión que requiere minimización o maximización. En el caso de problemas dinámicos, se requiere obtener un tipo deseado de relación entre una entrada y una señal de salida. Generalmente se consideran dos relaciones, a saber, la pendiente de las características de entrada/salida y la linealidad de las características de entrada/salida. La pendiente de las características de entrada/salida debe tener un cierto valor y tiene dos definiciones alternativas, una basada en una relación LTB y la segunda basada en una relación STB:

$$n = 10 \log(\beta^2)$$

$$n = -10 \log(\beta^2)$$

Donde  $\beta^2$  representa el cuadrado de pendiente de la relación de entrada / salida.

La linealidad a menudo se considera como una relación LTB y está relacionada con desviaciones de una relación puramente lineal entre la entrada y la salida:

$$n = 10 \log \left( \frac{\beta^2}{\sigma} \right)$$

Además, otras herramientas de análisis estadístico como ANOVA se emplean a menudo para el análisis de resultados. Utilizando los resultados del análisis y determinando los efectos entre los factores de los experimentos, el proceso de optimización se puede llevar a cabo de manera más efectiva.

**Aplicación del método de Taguchi en el mecanizado.** El método de Taguchi se aplica con éxito en una amplia gama de procesos y experimentos de mecanizado. Tanto el mecanizado convencional como el torneado, el fresado, la perforación y los procesos de mecanizado no convencionales, como el EDM, el mecanizado asistido por láser, el abrasivo pulido por chorro, maquinado por ultrasonidos, maquinado por chorro a alta presión y micro maquinado, están diseñados utilizando el método de Taguchi con el objetivo de optimizar los parámetros de estos procesos y determinar el efecto de varios parámetros para su resultado. Asiltürk I. Akkuş H. (2011)., Pang J.S. Ansari M.N. Zaroog O.S. Ali M.H. Sapuan S.M. (2014)., Lodhi B.K. Agarwal S. (2014).

### **3.3.3.- Metodología de superficie de respuesta. (RSM: response surface methodology).**

RSM es un grupo de técnicas matemáticas y estadísticas, a menudo empleadas en estudios de ingeniería con respecto a problemas de modelos, cuya estructura subyacente es desconocida y también optimiza el resultado deseado de estas cuestiones. El término Superficie de respuesta se emplea para describir la superficie que representa la salida de un proceso cuando los valores de los parámetros de entrada varían dentro de los rangos especificados. Este método es de gran importancia específicamente para problemas de mecanizado, como puede verse en la gran cantidad de trabajos científicos que emplean este método en la literatura. Makadia A.J. Nanavati J.I. (2013)., Camposeco Negrete C. (2015)., Alauddin M. Baradie M.A. Hashmi M.S.J. (1997).

El primer paso para el método RSM es determinar una función adecuada que represente la relación entre la entrada y la variable de salida y, en general, se desconoce., Si la respuesta del sistema examinado se puede modelar suficientemente usando una función lineal de las variables de entrada, se puede emplear un llamado modelo de primer orden. Si la respuesta es más compleja,

generalmente se emplea un modelo de segundo orden o incluso una combinación de un modelo de primer orden y un modelo de segundo orden. Los parámetros en los modelos de aproximación se determinan utilizando el método de mínimos cuadrados, como sucede también en el caso de los modelos de regresión estadística.

La bondad de ajuste de las superficies de respuesta indica la validez del estudio del sistema modelado. Se logra una estimación más precisa de los parámetros del modelo solo si el experimento correspondiente se realizó utilizando un método DOE adecuado. Para la mayoría de los estudios de RSM, se emplea un caso especial de diseño factorial, el método de **diseño compuesto central (CCD)**; sin embargo, también se pueden aplicar matrices ortogonales de Taguchi.

**Descripción de la Metodología de Superficie de Respuesta.** El proceso de optimización utilizando el método RSM es un procedimiento secuencial. El punto de inicio es a menudo un punto de la superficie de respuesta, que está lejos del punto óptimo y corresponde a las condiciones operativas existentes de un sistema. Posteriormente, el procedimiento de optimización lleva a la determinación de la proximidad del punto óptimo y luego se aplica un modelo de orden superior en esta área. Tras un posterior análisis se determina el punto óptimo. Por razones de simplicidad, el procedimiento de optimización inicial se realiza utilizando un modelo de primer orden, ya que se supone que el punto de inicio está lejos del punto óptimo.

Un método adecuado para la rápida convergencia al punto óptimo es el método de descenso más pronunciado, en caso de problemas de minimización o descenso más pronunciado, en caso de problemas de maximización. Este método consiste en un procedimiento numérico de movimiento a lo largo del camino de descenso / ascenso más pronunciado que conduce al área alrededor del punto óptimo. El siguiente paso del proceso de optimización es ajustar un modelo de segundo orden en los resultados experimentales.

El experimentador puede necesitar realizar experimentos adicionales para mejorar la precisión del modelo de segundo orden. El punto óptimo en una superficie de segundo orden se llama el punto estacionario; en este punto todas las derivadas parciales son cero. Sin embargo, debe determinarse si este punto es en realidad un punto de máximo, un punto de respuesta mínima o un punto de silla de montar.

El uso de un método DOE para el experimento es necesario para aplicar el método RSM. Esto conduce a una mejor distribución de puntos, reduce el error y da como resultado una estimación más precisa de los coeficientes de la función de regresión. Los diseños ortogonales de primer orden se usan a menudo cuando se consideran los modelos de primer orden y se usa el método CCD en el caso del diseño de segundo orden. El método CCD, es unos casos especiales de diseños factoriales fraccionados, que incluye también puntos centrales y axiales en el diseño, como puede verse en la Figura. 3.4. Más específicamente, un CCD involucra tres conjuntos de experimentos: un conjunto de diseño factorial, un conjunto de puntos centrales y un conjunto de puntos axiales.

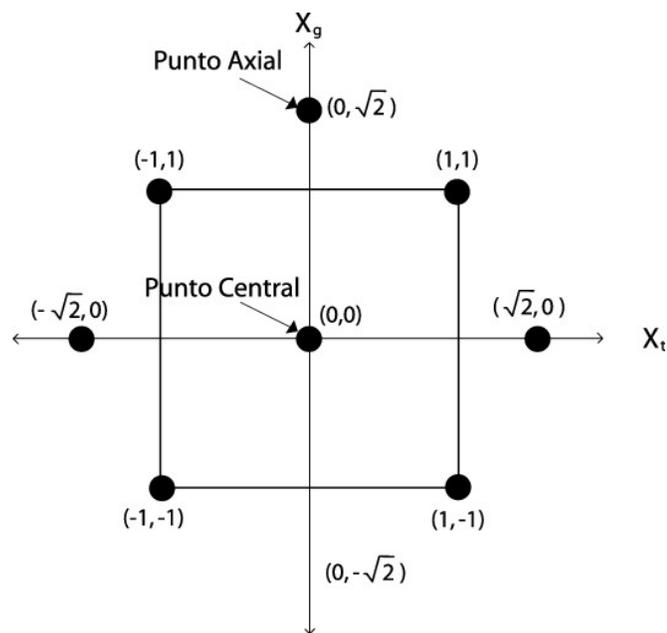


Figura 3.4.- Ejemplo de un diseño compuesto centrado de dos factores.

Los puntos centrales tienen valores iguales a las medianas utilizadas en el conjunto de diseño factorial y permiten una mejora de la precisión del experimento, mientras que el conjunto de puntos axiales implica puntos fuera del rango de puntos de diseño factorial para todos los factores.

En la Tabla 3.5 se presenta un ejemplo de un CCD. Por lo tanto, utilizando el método CCD se deben especificar dos parámetros: la distancia de las corridas axiales, es decir, los experimentos propuestos, desde el centro de diseño y el número de puntos centrales.

Tabla 3.5.- Diseño compuesto centrado. Experimento con dos factores.

<b>Experimento</b>	<b>Factor 1</b>	<b>Factor 2</b>
<b>1</b>	<b>-1</b>	<b>-1</b>
<b>2</b>	<b>-1</b>	<b>1</b>
<b>3</b>	<b>1</b>	<b>-1</b>
<b>4</b>	<b>1</b>	<b>1</b>
<b>5</b>	<b>-1.4142</b>	<b>0</b>
<b>6</b>	<b>1.4142</b>	<b>0</b>
<b>7</b>	<b>0</b>	<b>-1.4142</b>
<b>8</b>	<b>0</b>	<b>1.4142</b>
<b>9</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
<b>10</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
<b>11</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
<b>12</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
<b>13</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
<b>14</b>	<b>0</b>	<b>0</b>

Estos dos parámetros deben seleccionarse de tal manera que garanticen la rotación del diseño compuesto. Un diseño giratorio se define como un diseño que proporciona la misma variación de respuesta predicha para los puntos que se encuentran a la misma distancia del centro de diseño. El diseño de Box – Behnken se puede emplear como una alternativa al método CCD.

La diferencia del diseño de Box – Behnken es que los puntos de esquina y los puntos fuera del límite se omiten en el diseño. Sin embargo, los puntos medios de los bordes del espacio experimental se emplean en el diseño. (Figura 3.5.)

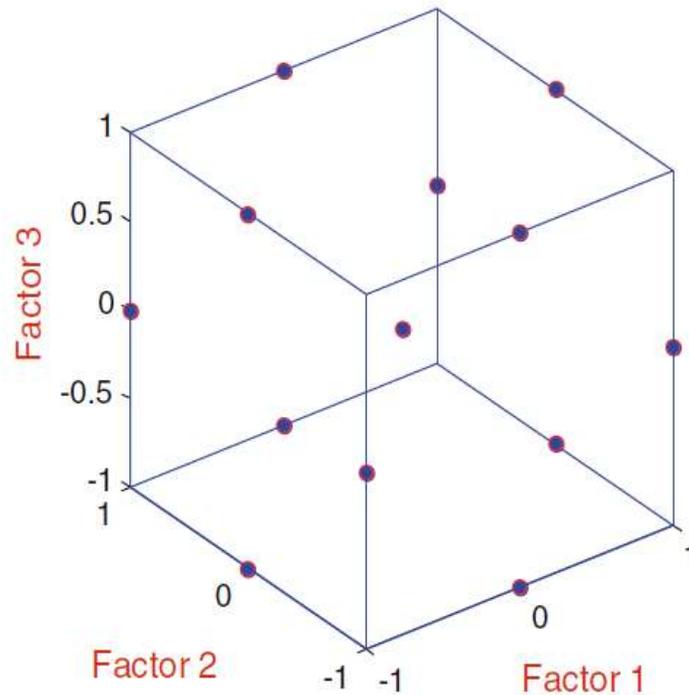


Figura 3.5.- Esquema de puntos en un diseño de Box-Behnken.

El diseño de Box – Behnken involucra menos puntos que el CCD, pero en este método se deben usar al menos tres factores. Por ejemplo, para un experimento de tres factores, CCD requeriría 20 puntos de prueba, mientras que el diseño de Box-Behnken requeriría 15 puntos de prueba.

El último método tiene un costo menor, pero debe emplearse solo si se supone que se conocen los límites experimentales. Un ejemplo del diseño de Box - Behnken se muestra en Tabla 3.6.

Tabla 3.6.- Parámetros del diseño Box-Behnken en un diseño de tres factores.

Experimento	Factor 1	Factor 2	Factor 3
1	-1	-1	0
2	-1	1	0
3	1	-1	0
4	1	1	0
5	-1	0	-1
6	-1	0	1
7	1	0	-1
8	1	0	1
9	0	-1	-1
10	0	-1	1
11	0	1	-1
12	0	1	1
13	0	0	0
14	0	0	0
15	0	0	0

El método RSM también se puede aplicar a problemas de respuesta múltiple. En este caso, las regiones de resultados óptimos se encuentran considerando las regiones óptimas de cada respuesta y luego el área que contiene todos estos puntos óptimos. Este problema también se considera como un problema de optimización restringido o se emplean funciones de deseabilidad para determinar el óptimo utilizando una sola función.

**Aplicación de RSM al mecanizado.** Como se mencionó anteriormente, el método RSM se ha aplicado una amplia gama de procesos de mecanizado. En concreto, el método RSM se ha aplicado a los siguientes procesos: torneado, fresado, EDM, torneado con chorro de agua abrasivo, mecanizado electroquímico asistido por abrasivo y alambre micro maquinado electroquímico. Makadia A.J. Nanavati J.I. (2013)., Camposeco Negrete C. (2015)., Alauddin M. Baradie M.A. Hashmi M.S.J. (1997).

En estas investigaciones, varios parámetros relacionados con los procesos de mecanizado se han analizado y se han utilizado con éxito el método RSM, como la rugosidad de la superficie, la optimización de la geometría de la herramienta, el rendimiento de la herramienta, el desgaste de la herramienta y la predicción de la vida útil de la herramienta, la selección de parámetros de mecanizado óptimos, consumo de energía en torneado y predicción de fuerzas de corte.

#### **3.3.4.- Análisis de la varianza.**

ANOVA es una herramienta de análisis importante para los experimentos. A menudo se usa como medio complementario para estudiar la variabilidad de los medios de las observaciones experimentales o para examinar la importancia de los factores en un experimento multifactorial.

El caso más sencillo de la prueba ANOVA se llama prueba ANOVA de una vía y se relaciona con un experimento de factor, donde se realizan múltiples experimentos para cada nivel de factor. Para un problema de un factor en varios niveles, las observaciones se pueden utilizar en un modelo adecuado. Dos de los métodos más comunes son el modelo de medios y el modelo de efectos. El modelo de los medios de comunicación considera cada vez más como la suma de los medios de comunicación el nivel de los factores y el componente del error.

El modelo de los efectos considera cada vez más la información experimental como la suma de los medios de comunicación globales de todas las observaciones y el significado asociado con los efectos debidos a cada nivel de factor. En los casos donde se puede probar las hipótesis sobre los medios de comunicación, y sobre los niveles de los factores que aparecen en el análisis, se emplea un modelo de efectos fijos. Por lo tanto, para un modelo de efectos fijos, se realizan pruebas estadísticas para la igualdad de medias de nivel.

Para realizar la prueba ANOVA, al principio, la varianza total se puede descomponer en términos: un término relacionado con cada nivel de factor y un término relacionado con errores. La prueba estadística para el ANOVA es una prueba F. F-test es una prueba estadística en la que se considera que el estadístico de prueba sigue una distribución F bajo la hipótesis nula. En la Figura 3.6 se presenta un esquema de la distribución F. Esta prueba se usa generalmente para determinar qué modelo se ajusta con mayor precisión a la población de la cual se tomaron muestras de los datos de un experimento. De hecho, ANOVA es el caso más conocido de una F-test.

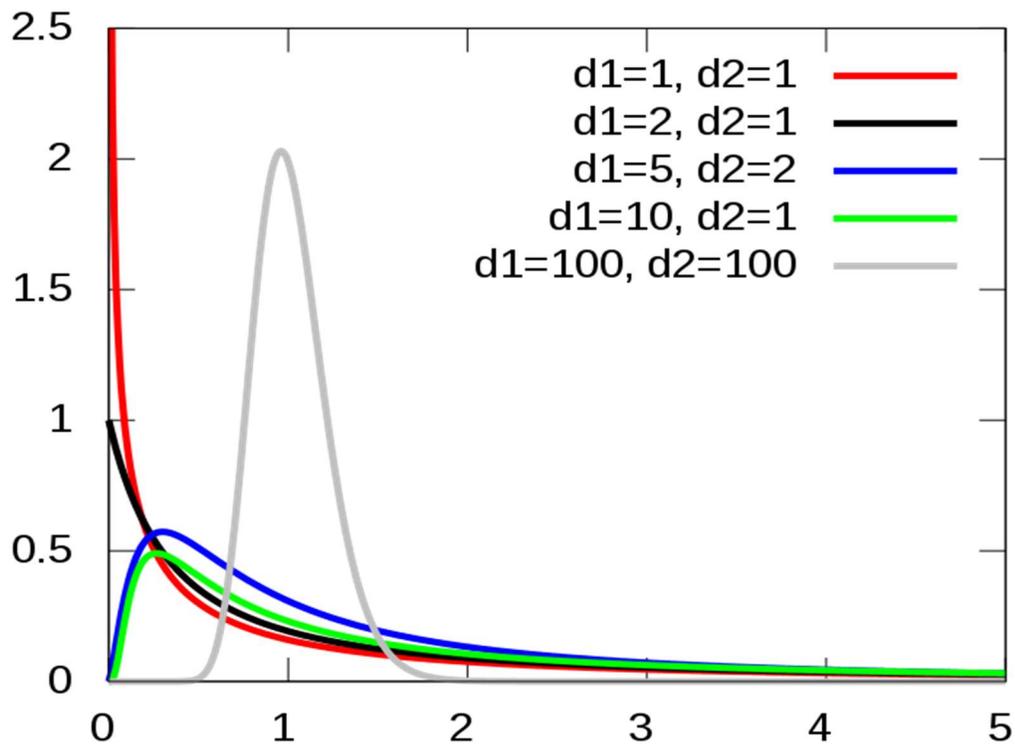


Figura 3.6.- Distribución F en varios casos, con diferentes grados de libertad en el numerador y en el denominador.

Comenzando con los dos términos de varianza (términos de suma de cuadrados), se calculan los cuadrados medios de estos términos de acuerdo con los grados de

libertad y luego se obtiene el valor para la prueba F mediante la relación entre ellos para determinar si se rechaza o no la hipótesis nula.

En caso de rechazo de la hipótesis nula, los valores medios para cada nivel difieren significativamente. En la Tabla 3.7 se muestra un ejemplo de un problema relacionado con dos parámetros. La prueba ANOVA se puede generalizar a una prueba de dos vías o una prueba de N-vías que involucra “N” factores. En estos casos, se puede examinar el efecto de interacción entre varios factores. Las pruebas ANOVA se emplean ampliamente como un medio para identificar la importancia de los parámetros de una ecuación de regresión y otros métodos de computación.

Tabla 3.7.- Tabla típica de un análisis de varianza, ANOVA.

<b>Fuente de variación</b>	<b>Suma de cuadrados</b>	<b>Grados de libertad</b>	<b>Cuadrado medio</b>	<b>Fo</b>	<b>P-valor</b>
<b>A</b>	<b>20.52</b>	<b>2</b>	<b>10.26</b>	<b>41.58</b>	<b>0.00006</b>
<b>B</b>	<b>12.3</b>	<b>4</b>	<b>3.075</b>	<b>12.46</b>	<b>0.0016</b>
<b>Error</b>	<b>1.97</b>	<b>8</b>	<b>0.24675</b>		
<b>Total</b>	<b>34.79</b>	<b>14</b>			

**Aplicación de ANOVA a problemas de mecanizado.** Aunque ANOVA se realiza en casi todos los análisis de resultados experimentales y se pueden encontrar numerosas aplicaciones de este método en la literatura, se realiza una selección de varios casos notables. El método ANOVA se aplica para analizar los resultados del mecanizado, fresado, la perforación, el EDM, el torneado asistido por chorro de alta presión, el micro-torneado láser y Mecanizado por chorro de agua abrasivo. Ramanujam R, Venkatesan K, Saxena V, Joseph P (2014) y Dittrich M. Dix M. Kuhl M. Palumbo B. Tagliaferri F. (2014).

### 3.3.5.- Métodos de regresión estadística.

El análisis de regresión es un proceso estadístico general para la determinación de relaciones entre varias variables estudiadas en un problema particular. El análisis de regresión proporciona información sobre cómo cambian los valores de una variable dependiente cuando cambia el valor de una o diferentes variables independientes al estimar su relación por medio de una función llamada generalmente la función de regresión. La variación de la variable dependiente alrededor de la función de regresión calculada a menudo se estima utilizando una distribución de probabilidad adecuada. Además, el análisis de regresión se puede emplear como una herramienta predictiva para predecir el comportamiento de un sistema en condiciones para las cuales no hay datos experimentales disponibles. El método más utilizado para el ajuste de datos en modelos de regresión es el método de mínimos cuadrados.

Según el tipo de función de regresión empleada, los métodos de regresión se pueden clasificar en métodos de regresión lineal y métodos de regresión no lineal. En la regresión lineal, se requiere que la variable dependiente sea una combinación lineal de los parámetros de la función de regresión. Sin embargo, las variables dependientes pueden ser una combinación no lineal de la variable independiente; eso significa que  $f(x) = b_3 X^3 + b_2 X^2 + b_1 X + b_0$  sigue siendo una función de regresión lineal ya que la relación entre  $f(x)$  y los parámetros "bi" es lineal. La regresión lineal en el caso de una única variable independiente se denomina regresión lineal simple, mientras que, en el caso de múltiples variables independientes, este proceso se denomina regresiones lineales múltiples.

Para ajustar los resultados experimentales en los modelos de regresión lineal, se emplean los enfoques de mínimos cuadrados u otros enfoques de minimización. Se han desarrollado varios modelos de regresión lineal con el fin de ampliar las capacidades del método, tales como: modelos lineales generales, donde la variable de respuesta se considera generalmente como un vector, modelos lineales generalizados, donde se supone que la variable de respuesta está delimitada o

Modelos lineales discretos y jerárquicos, donde el modelo de regresión consta de varios niveles.

Los modelos de regresión no lineal implican una función de modelado que es una combinación no lineal de los parámetros del modelo. En general, esta categoría de modelos de regresión es más preferible en los casos en que existe evidencia física que dicta el uso de una función que describe una relación no lineal de parámetros desconocidos. Por ejemplo, en biología, ese es el caso del famoso modelo de Michaelis-Menten para cinética de enzimas. Como puede verse en las siguientes fórmulas, este modelo puede escribirse en forma de una función no lineal ya que los parámetros desconocidos existen tanto en el numerador como en el denominador de la siguiente fracción, donde los parámetros  $V_{max}$  y  $K_m$  han sido sustituidos por  $\alpha_1$  y  $\alpha_2$  respectivamente.

$$v = \frac{V_{max}[S]}{K_m + [S]}$$

$$f(x, \alpha) = \frac{\alpha_1 x}{\alpha_2 + x}$$

Algunos tipos de funciones no lineales utilizadas en la regresión no lineal son: funciones exponenciales, funciones logarítmicas, funciones de potencia, funciones trigonométricas. En algunos casos, la función de Gauss, las curvas de Lorenz u otras distribuciones de probabilidad, p. Ej. Weibull, también puede emplearse, como se puede ver en la Figura 3.7.

Es importante mencionar que algunas funciones se pueden linealizar correctamente usando diferentes variables y luego se puede emplear el modelo de regresión lineal en esta función transformada. Los métodos iterativos se emplean a menudo para el proceso de adaptación, como los métodos de Newton-Raphson o Gauss. Además, el ajuste de los modelos se evalúa mediante pruebas estadísticas similares a las de los modelos de regresión lineal, pero se argumenta que las medidas como  $R^2$  son inadecuadas en el caso de la regresión no lineal.

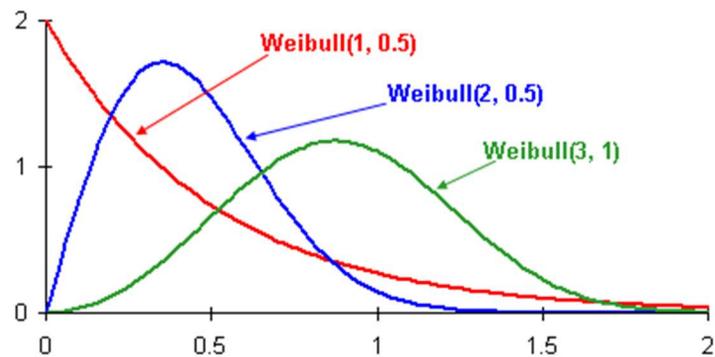


Figura 3.7.- Ejemplo de la distribución Weibull.

Una vez finalizado el proceso de ajuste, la función de regresión debe probarse utilizando varias medidas para determinar la validez del proceso de ajuste. Algunas medidas generales que suelen emplearse en diversas aplicaciones son el coeficiente de correlación múltiple R, el coeficiente de determinación  $R^2$ , el  $R^2$  ajustado y el error de la raíz cuadrada media (RMSE). El coeficiente de determinación se define a partir de las siguientes fórmulas.

Si " $\bar{y}$ ", denota la media de los datos observados en un experimento, entonces:

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$$

Entonces, la suma total de cuadrados, relacionada con la varianza de los datos experimentales, es definido como:

$$SS_{tot} = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$$

Y la suma de cuadrados de residuos se puede definir como:

$$SS_{res} = \sum_{i=1}^n (y_i - f_i)^2$$

Sobre la base de las definiciones anteriores, el coeficiente de determinación se puede definir como:

$$R^2 = 1 - \frac{SS_{res}}{SS_{tot}}$$

El  $R^2$  ajustado, indicado también como  $\overline{R^2}_{aj}$  se puede definir como:

$$\overline{R^2}_{aj} = 1 - (1 - R^2) \frac{n - 1}{n - p - 1}$$

donde “p” es el número total de regresores en el modelo y n es el tamaño de la muestra. Además, el RMSE se puede definir como:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{n}}$$

Donde  $\hat{y}_i$  denota un valor predicho, “ $y_i$ ” un valor experimental y n es el tamaño de la muestra. En general, un valor de R indica la correlación entre los valores pronosticados y observados,  $R^2$  indica la fracción de la variabilidad de los resultados obtenidos por el modelo de regresión, el  $\overline{R^2}_{aj}$  ajustado altera el valor de  $R^2$  cuando se agregan variables explicativas adicionales al modelo y RMSE indica la desviación estándar de los datos sobre el modelo de regresión. Los métodos de regresión se pueden combinar con varios métodos estadísticos, como ANOVA, para realizar un análisis más detallado de los resultados y para comprobar la validez del modelo de regresión.

**Aplicaciones de los métodos de regresión estadística en el mecanizado.** Los métodos de regresión se aplican al modelado de procesos de mecanizado. Con estos métodos se investigan varios procesos de mecanizado, a saber, torneado, fresado, taladrado y EDM. Además, diversos aspectos, como el desgaste de la herramienta y el control del estado de la herramienta, facilidad de maquinado, rugosidad de la superficie y la estimación de costos de proceso se analizan.

En varios de estos estudios la eficiencia de un modelo de regresión se compara con la de los métodos de cómputo. A partir de los estudios mencionados anteriormente, se concluye que, aunque los métodos de regresión exhiben su base matemática y poseen un claro valor explicativo, en general se demuestra que los modelos de regresión pueden funcionar bien cuando las relaciones son casi lineales en casos complejos y no lineales con un gran número de variables. Mukherjee S.N., Basu S.K. (1967)., Leone C. D'Addona D. Teti R. (2011)., Rao K.V. Murthy B. Rao N. (2013). y Kanlayasiri K. Boonmung S. (2007).

### **3.4.- Introducción a los procesos de manufactura.**

La fabricación de cosas ha sido una actividad esencial de las civilizaciones humanas desde antes de la historia registrada. Hoy en día se utiliza el término **manufactura** para denotar esta actividad. Por razones técnicas y económicas, la industria manufacturera es importante para el bienestar de Estados Unidos y de la mayoría de las naciones desarrolladas. La **tecnología** se define como la aplicación de la ciencia para proporcionar a la sociedad y a sus miembros aquellos objetos que necesitan o desean. Groover Mikell P. (2015).

En cuanto a la economía, la manufactura es un medio importante con el que una nación crea bienestar material. En Estados Unidos, las industrias manufactureras generan alrededor de 20% del PIB. Los recursos naturales de un país, como las tierras agrícolas, depósitos minerales y reservas petrolíferas, también crean bienestar. En Estados Unidos, la agricultura, minería e industrias similares general menos del 5% del PIB (la agricultura representa sólo alrededor del 1%). La construcción y las empresas públicas producen aproximadamente 5%. El resto corresponde a industrias de servicios, entre las que se incluyen el menudeo, el transporte, la banca, las comunicaciones, la educación y el gobierno. El sector de los servicios agrupa más de 75% del PIB de Estados Unidos. Tan solo el gobierno de ese país genera tanto PIB como el sector de manufactura; sin embargo, los servicios gubernamentales no crean riqueza.

En la economía moderna internacional, una nación debe poseer una base de manufactura (o tener recursos naturales significativos) si ha de contar con una economía fuerte y estándares de vida elevados para su pueblo. Como campo de estudio en el contexto moderno, la manufactura se puede definir de dos maneras: una tecnológica y otra económica. En el sentido tecnológico, la manufactura es la aplicación de procesos físicos y químicos para alterar la geometría, propiedades o apariencia de un material de inicio específico para fabricar piezas o productos; la manufactura también incluye el ensamble de diversas piezas para fabricar productos. Los procesos para llevar a cabo la manufactura involucran una combinación de máquinas, herramientas, energía y trabajo manual, como se ilustra en la figura 3.8.

En el sentido económico, la manufactura es la transformación de los materiales en artículos de valor mayor por medio de una o más operaciones de procesamiento o ensamblado según ilustra la figura. La clave es que la manufactura agrega valor al material combinando su forma o propiedades, o mediante su combinación con otros materiales que también han sido alterados. El material se habrá hecho más valioso por medio de las operaciones de manufactura ejecutadas en él. Cuando el mineral de hierro se convierte en acero, se le agrega valor. Si la arena se transforma en vidrio se le añade valor y cuando el plástico se moldea en la geometría compleja de una silla de jardín de vuelve más valioso.

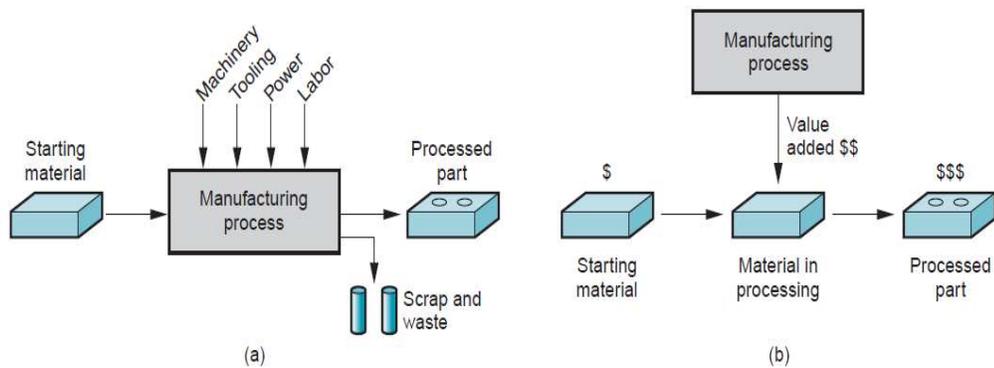


Figura 3.8.- Ejemplo de un proceso de manufactura clásico.

**Industrias manufactureras.** La industria consiste en empresas y organizaciones que producen o suministran bienes y servicios. Las industrias se clasifican como primarias, secundarias o terciarias. Las **industrias primarias** cultivan y explotan recursos naturales, como la agricultura y minería. Las **industrias secundarias** toman la producción de las primarias y la convierten en bien de consumo y capital. En esta categoría, la manufactura es la actividad principal, pero también quedan incluidas las construcciones y la generación de energía. Las **industrias terciarias** constituyen el sector de servicios de la economía.

Una compañía dedicada a la manufactura no puede hacer todo. Debe hacer solo ciertas cosas, y las debe hacer bien si quiere seguir siendo competitiva en la industria. La capacidad de manufactura se refiere a las limitaciones técnicas y físicas de una empresa de manufactura y cada una de sus plantas. Es posible identificar varias dimensiones de esta capacidad: Capacidad tecnológica de proceso, tamaño físico y peso del producto y capacidad de producción.

**Capacidad tecnológica de proceso.** La capacidad tecnológica de proceso de una planta es el conjunto de procesos manufactura con que dispone. Ciertas plantas realizan operaciones de maquinado, otras convierten lingotes de acero en lamina y unas más construyen automóviles. Las capacidades tecnológicas de proceso incluyen no solo los procesos físicos sino también la experiencia que tiene su personal de la planta en dichas tecnologías. Las compañías deben concentrarse en el diseño y la manufactura de productos que son compatibles con su capacidad tecnológica de proceso.

**Limitaciones físicas del producto.** Una planta con un conjunto dado de procesos está limitada en los términos de tamaño y el peso de los productos que pueden alojarse. Los productos grandes y pesados son difíciles de mover. Para hacerlo, la planta debe de equiparse con grúas con la capacidad de carga requerida. La limitante del tamaño y peso de un producto también se extiende a la capacidad física del equipo de manufactura.

**Capacidad de producción.** Una tercera limitante de la capacidad de una planta de manufactura es la cantidad de producción que puede obtener en un periodo específico. Es común llamar a dicha limitante de cantidad capacidad de planta, o capacidad de producción, y se define como la tasa máxima de producción que una planta alcanza en condiciones previstas de operación. Estas condiciones se refieren al número de turnos por semana, horas por turno, niveles de mano de obra directa. Por lo general, la capacidad de planta se mide en términos de las unidades producidas, como las toneladas de acero que se producen al año en una fundición o el número de automóviles producidos por una planta de ensamblado final.

### **3.4.1.- Los materiales en la manufactura.**

La mayor parte de los materiales para ingeniería se clasifican en una de tres categorías básicas: metales, cerámicos y polímeros.

**Metales.** Los metales que se emplean en la manufactura por lo general son aleaciones, que están compuestos de dos o más elementos, con al menos uno en forma metálica. Los metales y las aleaciones se dividen en dos grupos básicos: ferrosos, (el acero, hierro colado, etc.) no ferrosos (aleaciones de aluminio, cobre, oro, magnesio, níquel, plata, estaño, titanio, zinc y otros metales).

**Cerámicos.** Un cerámico se define como un compuesto que contiene elementos metálicos (o semimetálicos) y no metálico. Los elementos no metálico comunes con oxígeno, nitrógeno y carbono. Los cerámicos incluyen una variedad de materiales tradicionales y modernos. Los productos cerámicos tradicionales como la arcilla, sílice, alúmina y carburo de silicio. Los cerámicos modernos incluyen algunos de los materiales anteriores, como la alúmina. Los más nuevos incluyen carburos y nitruros como abrasivos o herramientas de corte.

**Polímeros.** Un polímero es un compuesto formado por unidades estructurales repetidas denominadas meros, cuyos átomos comparten electrones que forman

moléculas muy grandes. Por lo general, los polímeros consisten en carbono más uno o más elementos como hidrógeno, nitrógeno, oxígeno y cloro, los polímeros se dividen en: polímeros termoplásticos, polímeros termoestables y polímeros elastómeros.

### **3.4.2 Operaciones que se realizan en un proceso de manufactura.**

Una operación de proceso utiliza energía para modificar la forma, las propiedades físicas o la apariencia de una pieza a fin de agregar valor al material. Las formas de la energía incluyen la mecánica, térmica, eléctrica y química. La energía se aplica en forma controlada por medio de maquinaria y herramientas. También se requiere de la energía humana, pero los trabajadores se emplean por lo general para controlar las máquinas, supervisar las operaciones y cargar y descargar piezas antes y después de cada ciclo de operación.

La mayoría de las operaciones de producción generan desperdicios o sobrantes, ya sea como un aspecto natural del proceso (maquinado) o en forma de piezas defectuosas ocasionales. Un objetivo importante de la manufactura es reducir el desperdicio en cualquiera de sus formas. Se distinguen tres tipos generales de operaciones de proceso: operaciones de formado, operaciones de mejoramiento de una propiedad y operaciones de proceso de superficies.

**Operaciones de formado.** La mayoría de los procesos de formado aplican calor o fuerza mecánica, o una combinación de ambas, para que surtan un efecto en la geometría del material de trabajo. Hay varias maneras de clasificar los procesos de formado. La clasificación tiene cuatro categorías:

## 1) Procesos de solidificación.

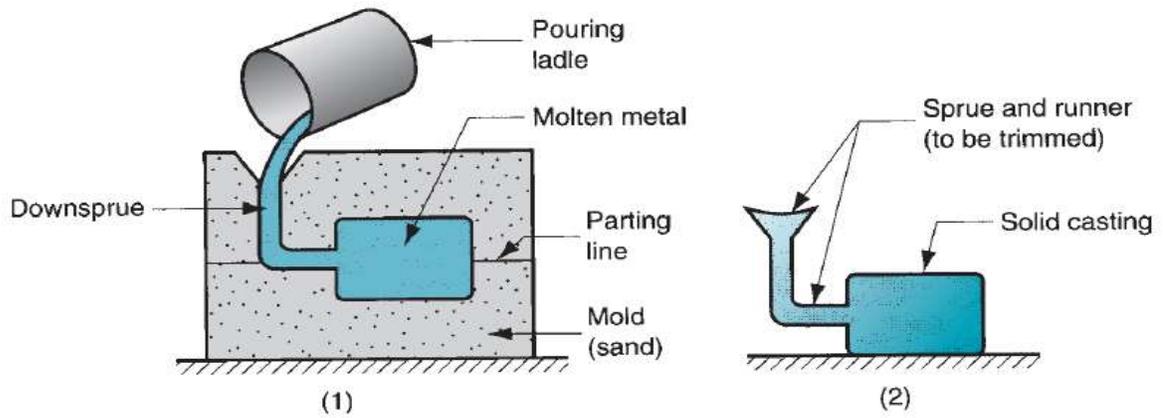


Figura 3.9.- Ejemplo de un proceso de fundición y moldeado.

## 2) Procesamiento de partículas o metalurgia de polvos.

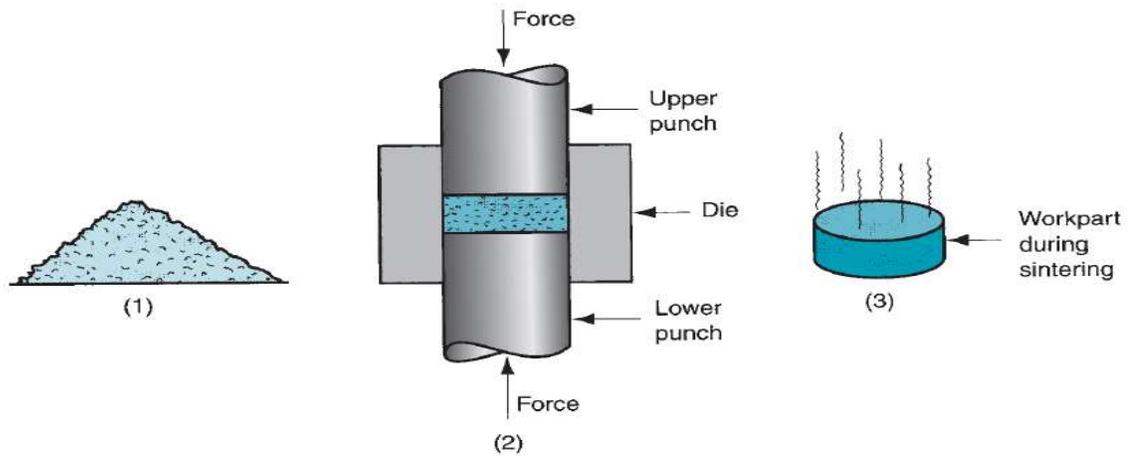


Figura 3.10.- Ejemplo de un proceso de Metalurgia de polvos.

### 3) Procesos de deformación.

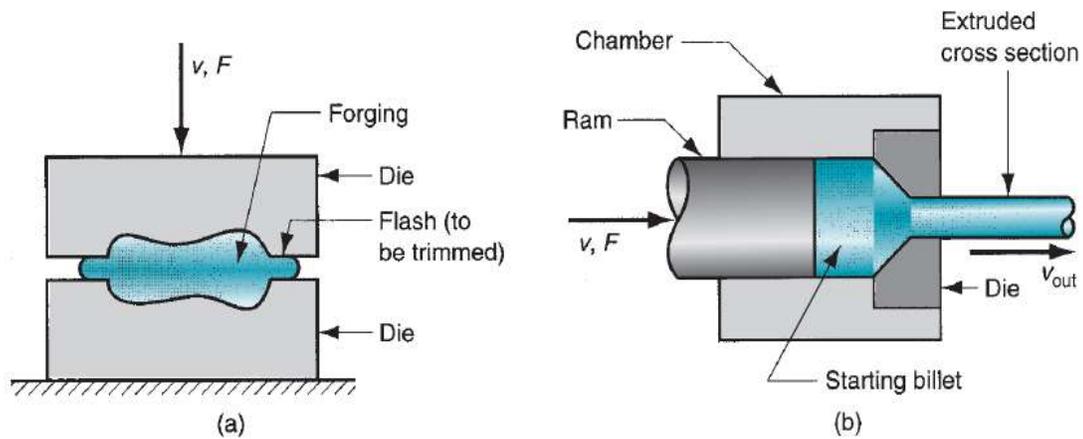


Figura 3.11.- Ejemplo algunos procesos de deformación comunes. (a) Forjado; y (b) extrusión.

### 4) Procesos de remoción de material.

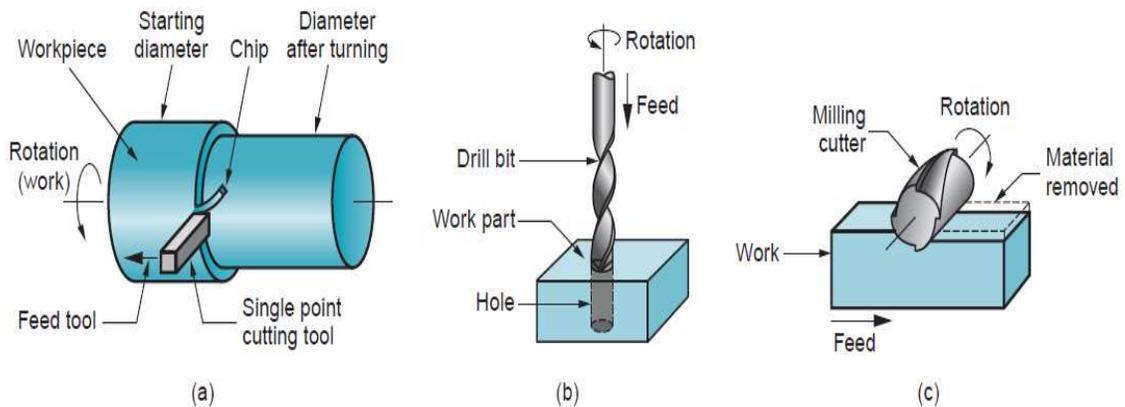


Figura 3.12.- Ejemplo de Operaciones comunes de maquinado. (a) Torneado (b) taladrado y (c) fresado.

**Operaciones de mejoramiento de una propiedad.** El segundo tipo general de proceso de una pieza se lleva a cabo para mejorar las propiedades mecánicas o físicas del material de trabajo. Estos procesos no alteran la forma de la pieza, salvo de manera accidental en algunos casos. Los procesos más importantes de mejoramiento de una propiedad involucran los tratamientos térmicos, que incluyen vidrios y templado de metales, el satirizado de metales y cerámicos pulverizados.

**Operaciones de proceso de superficies.** Las operaciones de procesamiento de superficies incluyen: limpieza, tratamiento de una superficie y procesos de recubrimientos y deposición de una partícula delgada. La limpieza incluye procesos tanto químicos como mecánicos para retirar de la superficie suciedad, aceite y otros contaminantes. Los tratamientos de superficies incluyen trabajos mecánicos como granallado y chorro de arena, así como procesos físicos como difusión e implantación de iones. Los procesos de recubrimientos y deposición de una película delgada aplican una capa de material a la superficie exterior de la pieza que se trabaja.

### **3.4.3.- Materiales en la ingeniería, metales y sus aleaciones.**

Los metales son los materiales más importantes en la ingeniería. Un **metal** es una categoría de materiales que se caracterizan generalmente por tener propiedades de ductilidad, maleabilidad, lustre y elevada conductividad eléctrica y térmica. La categoría incluye tanto a elementos metálicos como a sus aleaciones.

La importancia tecnológica y comercial de los metales se debe a las propiedades generales siguientes, que poseen virtualmente todos los metales comunes:

- **Rigidez y resistencia elevada.** Los metales pueden alearse para darles rigidez, resistencia y dureza elevadas; se les utiliza para que proporcionen el marco estructural para la mayoría de los productos de la ingeniería.

- **Tenacidad.** Los metales tienen la capacidad de absorber energía mejor que otras clases de materiales.
- **Conductividad eléctrica buena.** Los metales son conductores debido a su enlace metálico, que permite el movimiento libre de los electrones como transportadores de carga.
- **Conductividad térmica buena.** Los enlaces metálicos también explican por qué los metales generalmente conducen el calor mejor que los cerámicos y los polímeros.

Una **aleación** es un metal compuesto de dos o más elementos, al menos uno de los cuales es metálico. Mediante las aleaciones es posible mejorar la resistencia, la dureza y otras propiedades en comparación con los metales puros.

Los metales se convierten en piezas y productos que conllevan una variedad de procesos de manufactura. La forma inicial de los metales difiere, lo que depende del proceso. Las categorías principales son:

1. **Metal fundido**, en la que forma inicial es una pieza fundida.
2. **Metal forjado**, en la que el metal ha sido trabajado o puede serlo (por ejemplo, el rolado) después de la fundición; en general, en comparación con los fundidos, a los metales forjados se les asocia propiedades mecánicas mejores.
3. **Metal pulverizado**, en la que el metal es adquirido en forma de polvos muy finos para convertirlos en piezas por medio de técnicas metalúrgicas especiales para ello.

Los metales se clasifican en dos grupos principales:

1. **Ferrosos**, los que se basan en el hierro.
2. **No ferrosos**, todos los demás.

La mayoría de los aceros comercialmente importantes se agrupan en las categorías siguientes:

**Acero al carbono.** Estos aceros contienen carbono como elemento principal de la aleación, y solo pequeñas cantidades de otros elementos, aproximadamente 0.4% de manganeso más cantidades menores de silicio, fósforo y azufre. Es común que los aceros al carbono se clasifiquen en tres grupos, de acuerdo con su contenido de carbono:

1. **Aceros al bajo carbono.** Contienen menos de 0.20% de C y son, por mucho, los más utilizados. Las aplicaciones normales son en las piezas automotrices de lámina, placa de acero para la fabricación y vías férreas.
2. **Aceros al medio carbono.** Su contenido de carbono varía entre 0.20 y 0.50%, y se especifican para aplicaciones que requieren una resistencia mayor que las de los aceros al bajo carbono. Las aplicaciones incluyen componentes de maquinaria y piezas de motores como cigüeñales y bielas.
3. **Aceros al alto carbono.** Contienen carbono en cantidades superiores a 0.50% y se especifican para aplicaciones que necesitan resistencias aún mayores, así como rigidez y dureza. Algunos ejemplos son resortes, herramientas, cuchillas y piezas resistentes al desgaste.

**Aceros de baja aleación.** Son aleaciones de hierro-carbono que contienen elementos adicionales en cantidades que totalizan menos del 5% del peso. Debido a estas adiciones, los aceros de baja aleación tienen propiedades mecánicas superiores a las del carbono para aplicaciones específicas. Las propiedades superiores por lo general significan más resistencia, dureza, dureza en caliente, resistencia al desgaste, tenacidad y combinaciones más deseables de éstas. Los efectos de los ingredientes principales de la aleación se resumen como sigue:

1. **El cromo (Cr).** Mejora la resistencia, dureza, resistencia al desgaste y dureza en caliente, además que proporcionan mejora la resistencia a la corrosión.

2. **El manganeso (Mn).** Mejora la resistencia y dureza del acero. Cuando este se encuentra caliente, la templabilidad mejora con el aumento de manganeso.
3. **El molibdeno (Mo).** Incrementa la tenacidad y dureza en caliente. También mejora la templabilidad y forma carburos que dan resistencia al desgaste.
4. **El níquel (Ni).** Mejora la resistencia y la tenacidad. Incrementa la dureza, pero no tanto como los otros elementos de las aleaciones de acero. En cantidades significativas mejora la resistencia a la corrosión.
5. **El vanadio (V).** Inhibe el crecimiento de granos durante el procesamiento a temperaturas elevadas, la cual mejora la resistencia y tenacidad del acero.

**Aceros inoxidables.** Son los aceros que constituyen un grupo de aceros altamente aleados diseñados para proporcionar gran resistencia a la corrosión. El elemento principal de la aleación del acero inoxidable es el cromo, por lo general arriba del 15%. El cromo de la aleación forma una película de óxido impermeable, delgada, en una atmósfera oxidante, que protege a la superficie de la corrosión.

#### **3.4.4.- Sistemas de producción y planeación de procesos.**

Para operar de manera eficaz, una empresa de manufactura debe tener sistemas que le permitan cumplir eficazmente su tipo de producción. Los sistemas de producción se componen de personas, equipos y procedimientos diseñados para la combinación de materiales y procesos que constituyen las operaciones de manufactura de una empresa. Los sistemas de producción se pueden dividir en dos categorías: instalaciones de producción y sistemas de soporte para la manufactura.

Las *instalaciones de producción* se refieren a los equipos físicos y a la disposición de los equipos en la fábrica. Los *sistemas de soporte para la manufactura* son los procedimientos utilizados por la compañía para gestionar la producción y resolver los problemas técnicos y logísticos que se encuentran al pedir los materiales,

trasladar el trabajo a través de la fábrica y asegurar que los productos cumplan los estándares de calidad. Ambas categorías incluyen personas, quienes son las que hacen que estos sistemas funcionen.

Instalaciones de producción. Las instalaciones de producción consisten en la fábrica y los equipos dentro de ésta, que incluyen máquinas de producción, dispositivos para el manejo de materiales y otros equipos. El equipo entra en contacto directo con las piezas y/o ensamblajes cuando éstos se están fabricando. Las instalaciones “tocan” al producto. Las instalaciones también incluyen la forma en que el equipo está dispuesto en la fábrica, la distribución de planta. Por lo general el equipo se organiza en grupos lógicos, que se conoce como sistemas de manufactura.

Una compañía manufacturera intenta diseñar sus sistemas de manufactura y organizar sus fábricas para servir a la misión particular de cada planta de la manera más eficiente. A través de los años, ciertos tipos de instalaciones de producción han llegado a ser reconocidos como la forma más adecuada de organizarse para una combinación dada de variedad de productos y cantidad de producción. Se requieren diferentes tipos de instalaciones para cada uno de los tres rangos de cantidades de producción anual: producción baja, media y alta.

**Producción en baja cantidad.** En el rango de cantidad baja (1 a 100 unidades/año) suele utilizarse el término taller de trabajo para describir el tipo de instalación de producción. Un taller de trabajo hace pequeñas cantidades de productos especializados y personalizados. Los productos suelen ser complejos como cápsulas espaciales, aviones prototipos y maquinaria especial. El equipo en un taller de trabajo es de uso general y la fuerza de trabajo es altamente calificada. Los trabajadores y los equipos de procesamiento van al producto en vez de trasladar el producto hacia el equipo. Este tipo de disposición se conoce como *distribución de posición fija*.

Con frecuencia, los componentes individuales de estos grandes productos se hacen en fábricas en las que el equipo se distribuye de acuerdo con su función o tipo. Esta

disposición se denomina *distribución por procesos*. Los tornos están en un departamento, las fresadoras están en otro, y así sucesivamente. La distribución por proceso se caracteriza por su flexibilidad, puesto que puede dar cabida a una gran variedad de secuencias de operación para diferentes configuraciones de piezas.

Producción en mediana cantidad. En el rango de cantidad media (de 100 a 10000 unidades anuales) se distinguen dos tipos diferentes de instalaciones, según la variedad de productos. Cuando la variedad de productos es intensa, el enfoque habitual es la *producción por lotes*, en la que se hace un lote de un producto, después de lo cual se cambia el equipo de manufactura para producir un lote del siguiente producto, y así sucesivamente. La producción por lotes suele usarse en situaciones de fabricación contra existencia, en las que se fabrican artículos para reponer el inventario que se ha agotado gradualmente debido a la demanda.

Alta producción. Con frecuencia, el rango de alta cantidad (de 10 000 a millones de unidades al año) se conoce como *producción en masa*, sobre todo cuando las cantidades anuales exceden 100 000 unidades. La situación se caracteriza por una alta tasa de demanda para el producto, y el sistema de manufactura está dedicado a la producción de ese elemento en particular. Es posible distinguir dos categorías en la producción en masa: la producción por cantidad y la producción en línea de flujo. La *producción por cantidad* implica la producción en masa de piezas individuales en partes individuales del equipo. Por lo general, involucra el uso de máquinas estándar (por ejemplo, prensas de estampado). La *producción en línea de flujo* implica varios equipos o estaciones de trabajo dispuestas en secuencia, y las piezas de trabajo se desplazan físicamente a través de la secuencia para completar el producto. Las estaciones de trabajo y los equipos están diseñados específicamente para el producto a fin de maximizar su eficiencia.

Esta disposición se denomina *distribución por producto*, y las estaciones de trabajo se disponen en una línea larga, o en serie de segmentos de línea conectados entre sí. Por lo general las piezas de trabajo se mueven entre las estaciones mediante

una banda transportadora mecánica. En cada estación se realiza una pequeña cantidad del trabajo total sobre cada unidad del producto. Groover Mikell P. (2015).

## CAPITULO 4.- METODOLOGÍA

La ingeniería es un proceso que involucra la interacción de muchas habilidades y disciplinas. Desde tiempos lejanos el hombre ha buscado una y varias formas de resolver sus problemas y para resolver problemas específicos en ingeniería, se han desarrollado varias estrategias según el área o subdisciplina de la ingeniería que se trate como menciona Grech (2001)., Sin embargo, en este trabajo utilizaremos la metodología de diseño de experimentos de acuerdo con Montgomery (2019).

Se lleva a cabo un diseño experimental utilizando un arreglo ortogonal L-18 en un centro de torneado, se eligió una pieza de acero al carbón como unidad experimental para ser maquinada en el experimento. A partir de los resultados experimentales, se utiliza como variable de respuesta la amplitud de la vibración de la herramienta de corte, bajo diferentes criterios de desempeño. Mediante el análisis de varianza, ANOVA se determina la significancia y porcentaje de contribución de cada uno de los parámetros o variables de operación bajo estudio.

### 4.1 Diseño de Investigación (o Nivel de la Investigación).

El tipo de investigación es experimental, con un solo grupo experimental evaluado con una prueba y una prueba posterior, porque se manipula la variable independiente y es un diseño experimental. Montgomery D.C., (2019)., para analizar las mejoras que tiene sobre la variable dependiente. Ver figura 4.1.



Figura 4.1.- Esquema de experimento y variables.

El tipo de diseño será experimental, con un solo grupo experimental evaluado con una prueba previa y una prueba posterior. Esto, debido a que la población está conformada por todas las piezas de acero que podrían maquinarse en un día en un torno CNC lo cual no permitiría el agrupamiento de un grupo de control. Es decir, los diseños experimentales se utilizan cuando el investigador pretende establecer el posible efecto de una causa que se manipula. Se lleva a cabo un experimento para analizar si una o más variables independientes afectan a una o más variables dependientes. Kirk, R.E. (2013)., y Montgomery D.C. (2019).

En un experimento, la variable independiente resulta de interés para el investigador, ya que hipotéticamente será una de las causas que producen el efecto supuesto. Para obtener evidencia de esta supuesta relación causal, el investigador manipula la variable independiente y observa si la dependiente varía o no. Aquí, manipular es sinónimo de hacer variar o asignar distintos valores a la variable independiente. La variable dependiente no se manipula, sino que se mide para ver el efecto que la manipulación de la variable independiente tiene en ella. Esto se esquematiza en la figura 4.2 tomada de Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2014). *Metodología de la investigación*.

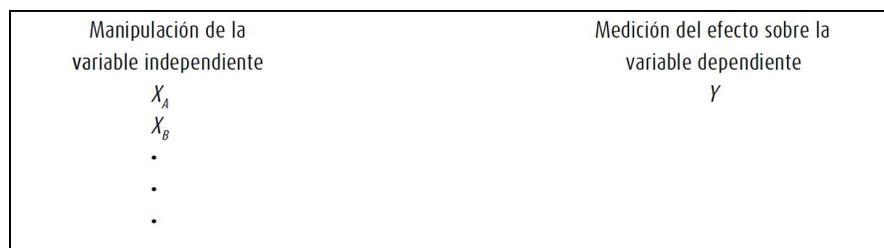


Figura 4.2.- Diseño de preprueba-posprueba con un solo grupo.

Se utiliza la letra “X” para simbolizar una variable independiente o tratamiento experimental. Las letras o subíndices “A, B...” indican distintos niveles de variación de la independiente y la letra “Y” se utiliza para representar una variable dependiente.

## 4.2.- Operacionalización de Variables. Relación y Conceptualización.

### 4.2.1.- Definición Conceptual

**Variables Independientes:** Metodología Diseño de Experimentos.

**Velocidad:** Este dato está en función de las características del material, del grado de mecanizado que se desee y del tipo de herramienta que se utilice. El programa permite adaptar cada momento la velocidad de giro a la velocidad más conveniente. Puede expresarse como velocidad de corte o revoluciones por minuto del cabezal. Una velocidad de corte alta permite realizar el mecanizado en menos tiempo, pero acelera el desgaste de la herramienta.

**Avance:** Hay dos tipos de avance para los carros, uno de ellos muy rápido, que es el avance de aproximación o retroceso al punto de partida, y otro que es el avance de trabajo. Este también está en función del tipo de material, calidad de mecanizado y grado de acabado superficial. Puede expresarse en milímetros por revoluciones o milímetros de avance por minuto.

**Profundidad:** Es la distancia radial que abarca una herramienta en su fase de trabajo, depende de las características de la pieza y de la potencia del torno.

**Refrigerante:** En muchos mecanizados es necesario refrigerar la zona donde está actuando la herramienta, esta función se programa mediante una función auxiliar.

**Buril:** Es una herramienta de corte típica para usar en un torno (también conocida como corta frío) consta principalmente de un cuerpo, mango o vástago. y de un cabezal donde se encuentra la parte cortante.

### **Variable Dependiente:**

**Rugosidad:** En mecánica la rugosidad es el conjunto de irregularidades que posee una superficie. La mayor o menor rugosidad de una superficie depende de su acabado superficial. Éste, permite definir la micro geometría de las superficies para hacerlas válidas para la función para la que hayan sido realizadas. Es un proceso que, en general, habrá que realizar para corregir los errores de forma y las ondulaciones que pudiesen presentar las distintas superficies durante su proceso de fabricación (fundición, forja, laminación, etc).

En el Sistema Internacional la unidad de rugosidad es el micrómetro o micra ( $1\text{micra} = 1\ \mu\text{m} = 0,000001\ \text{m} = 0,001\ \text{mm}$ ), mientras que en el sistema anglosajón se utiliza la micropulgada ( $\mu''$ ). Esta medida se indica en los planos constructivos de las piezas mediante signos y valores numéricos, de acuerdo a las normas de calidad existentes, que varían entre países.

**Vibración:** La vibración es una oscilación mecánica en torno a una posición de referencia y es el resultado de fuerzas dinámicas en las máquinas o estructuras que tienen partes en movimiento o sometidas a acciones variables. El número de veces que tiene lugar el movimiento cíclico completo en un segundo se conoce como frecuencia, y se mide en hertzios (Hz). La frecuencia es igual a la inversa del período. En el proceso de corte en un torno, la vibración puede ser axial y tangencial.

### **4.2.2.- Definición Operacional**

**Variables Independientes:** Metodología Diseño de Experimentos.

La metodología del diseño de experimentos, según Gutiérrez Pullido H. (2014)., es una estrategia de mejora continua del negocio, que busca mejorar el desempeño de los procesos de una organización y reducir su variación; esto lleva a encontrar y eliminar las causas de los errores, defectos y retrasos en los procesos del negocio,

tomando como punto de referencia en todo momento a los clientes y sus necesidades. Esta estrategia se apoya en una metodología altamente sistemática y cuantitativa, orientada a la mejora de la calidad del producto o del proceso.

**Variable Dependiente:** Rugosidad.

La Metodología Diseño Experimental, pretende mejorar el proceso fabricación de piezas de acero en un torno CNC, lo cual se sabe que mientras menor sea la rugosidad de la pieza, más alto será el nivel de sigma de un proceso o producto su calidad es mejor. Asimismo, se llevó a cabo la manipulación de variables de operación, donde se utilizaron arreglos ortogonales para la recolección de datos.

### 4.3. Población y Muestra

**Unidad de análisis:** Es todo el sistema de investigación, en particular todas las piezas de acero fabricadas en un torno CNC.

**Población:** Para poder determinar cómo influye la metodología del diseño de experimentos en la población está formada por todas las piezas de acero fabricadas en un torno CNC en el año 2018-2019.

**Muestra:** La muestra fue de tamaño  $n=18$ , con dos réplicas de acuerdo a un arreglo ortogonal.

**Diseño Muestral:** La muestra se obtuvo utilizando un arreglo ortogonal llamado L18.

### 4.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos, validez y confiabilidad

#### **Técnicas e instrumentos de recolección de datos.**

Se ejecutarán, revisión de base de datos y la observación directa de los hechos, los cuales se basan en las declaraciones escritas que permitan acceder a la forma como se vienen realizando todo el proceso de fabricación de piezas de acero en un torno CNC, y en el registro sistemático de la adaptación de los operarios. Los instrumentos para utilizarse serán en forma de; ficha de recolección de datos que me permita en la observación y evaluar objetivamente el proceso, de modo que se tenga toda la información necesaria del área, a fin de tomar las mejores decisiones.

## **Validez y confiabilidad del Instrumento.**

La validez se refiere que, la calificación o resultado obtenido mediante la aplicación del instrumento, mide lo que realmente se desea medir, en este caso, la ficha de recolección de datos y la revisión de datos corresponde a los instrumentos para medirlos. La validación del instrumento fue realizada mediante el juicio lógico obtenido de muchos casos de éxito a nivel mundial como se fundamenta en la revisión bibliográfica realizada. Por otro lado, la confiabilidad de los instrumentos se da mediante la aprobación de los registros de datos de ambas variables, los cuales son recogidos de la bitácora o registro que son recolectados y llenados conforme transcurre el experimento.

### **4.5.- Métodos de análisis de datos**

En el presente trabajo de investigación se harán dos tipos de análisis, el primero será de tipo descriptivo mediante un adecuado registro en tablas, gráficas, bitácora y todos los documentos y herramientas que la metodología despliega durante su realización.

El segundo será de tipo experimental e inferencial; ya que se utilizó para la contratación de las hipótesis y comparación de medias a través de la prueba de "F" de Fisher. Cabe resaltar que, para realizar el análisis de todos los datos, estos serán recopilados en el área de equipos CNC del ITCC; y se realizará un archivo con todos los registros obtenidos.

### **4.6. Aspectos éticos**

Los aspectos éticos en que se basa este proyecto son la fiabilidad y la validez de todos los datos recolectados, los cuales deben tener las pruebas o los instrumentos

adecuados para la toma de datos, ya que garantiza que toda información presentada es merecedora de crédito y confianza.

#### **4.7. Desarrollo de la tesis**

La optimización estadística es un método de gestión de cambios y resolución de problemas. Se considera un ciclo de desarrollo de proyectos de mejora y es presentado muchas veces como parte del programa Gupta R., Verma P.L. and Jain S.(2018). La metodología de diseño experimental de acuerdo con Montgomery D..C. (2019)., consiste básicamente en los siguientes pasos:

##### **1.-Comprension y planteamiento del problema.**

Es importante solicitar la opinión de todas las partes implicadas: cuerpo técnico, aseguramiento de calidad, manufactura, división comercial, dirección, clientes y personal operativo (quienes normalmente saben mucho del asunto, pero con frecuencia son ignorados). Un planteamiento claro del problema contribuye a menudo en forma sustancial a un conocimiento del fenómeno y de la solución final del problema.

##### **2.-Eleccion de factores y niveles.**

El experimentador debe elegir los factores que varían en el experimento, los intervalos de dicha variación y los niveles específicos a los cuales se hará el experimento. También debe considerarse la forma en que se controlan estos factores y como se les medirán.

##### **3.-Selección de la variable de respuesta.**

Al seleccionar la respuesta o variable dependiente, el experimentador debe estar seguro de que la respuesta que se va a medir realmente provea información útil a

cerca del proceso de estudio. La capacidad de medición (o el error de medición) también es un factor importante.

#### **4.-Elección del diseño experimental.**

Para elegir el diseño necesario, considerar el tamaño muestral (número de repeticiones), seleccionar un orden adecuado para los ensayos experimentales, y determinar si hay implicado bloqueo u otras restricciones de aleatorización.

#### **5.- Realización del experimento.**

Cuando se realiza el experimento, es vital vigilar el proceso cuidadosamente para asegurar que todo se haga conforme a lo planeado. En esta fase, los errores en el procedimiento suelen anular la validez experimental. La planeación integral es decisiva para el proceso.

#### **6.-Análisis de datos.**

Deben emplearse métodos estadísticos para analizar los datos. De modo que los resultados y conclusiones sean objetivos más apreciativos. Existen muchos excelentes paquetes de software para el análisis de datos, y los métodos gráficos sencillos son importantes en la interpretación de datos.

#### **7.-Conclusiones y recomendaciones.**

Una vez que se hayan analizado los datos, el experimentador debe extraer conclusiones prácticas de los resultados y recomendar un curso de acción. En esta fase a menudo son útiles los métodos gráficos, en especial al presentar resultados a otras personas. También deben realizarse corridas de seguimiento y pruebas de confirmación para validar las conclusiones del experimento.

Durante todo este proceso es necesario tener presente que la experimentación es parte importante del proceso de aprendizaje, en la cual formulamos tentativamente

hipótesis acerca de un sistema, realizamos experimentos para investigar dichas hipótesis, y con base con los resultados formulamos nuevas hipótesis, etc. Esto sugiere que la experimentación es iterativa. Suele ser un grave error diseñar un experimento muy grande al principio de un estudio. Para que un experimento sea exitoso es necesario conocer los factores importantes, los intervalos en los cuales deben hacerse variar estos factores, la cantidad adecuada de niveles por usar y las unidades de medida apropiada para estas variables. Por lo general no se conocen a la perfección las respuestas a estas preguntas, sino que se aprende acerca de ellas a medida que se avanza.

La relación S/N es una transformación usada por el Dr. Taguchi para incorporar el efecto de la variación y no sólo el efecto de la media en un experimento, para el caso que nos interesa es: S/R menor es mejor

$$S/R = -10 \log \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right)$$

Donde “n” representa el número de réplicas, sin importar los niveles de variables de ruido y la cantidad dentro del símbolo de suma representa la media de la suma de cuadrados de los datos medidos. En la relación señal / ruido, el objetivo común siempre es maximizarlas. Lo anterior se puede interpretar como minimizar la variación.

Para los tres tipos de relación señal / ruido, el objetivo común siempre es maximizarlas. Lo anterior se puede interpretar como minimizar la variación. Los factores por investigar pueden pertenecer a alguna de las siguientes categorías:

- a) Factores que afectan la media solamente.
- b) Factores que afectan la media y la variación.
- c) Factores que afectan la variación solamente.
- d) Factores que no afectan ni la media ni la variación.

Los factores tipo **b** y **c** se usan para reducir la variación, mientras que los factores tipo **a** sirven para ajustar la media. Los factores tipo **d** se ponen al nivel más económico.

La parte fundamental de la metodología ideada por el matemático japonés G. Taguchi es la optimización de productos y procesos, a fin de asegurar productos robustos, de alta calidad y bajo costo.

La metodología Taguchi consta de tres etapas: Diseño del sistema, Diseño de parámetros y Diseño de tolerancias. De estas tres etapas, la más importante es el diseño de parámetros cuyos objetivos son:

- a) Identificar qué factores afectan la característica de calidad en cuanto a su magnitud y en cuanto a su variabilidad.
- b) Definir los niveles “óptimos” en que debe fijarse cada parámetro o factor, a fin de optimizar la operación del producto y hacerlo lo más robusto posible.
- c) Identificar factores que no afectan substancialmente la característica de calidad a fin de liberar el control de estos factores y ahorrar costos de pruebas.

Para lograr lo anterior se ha manejado una serie de herramientas estadísticas conocida como diseño de experimentos, tratadas anteriormente. Taguchi ha propuesto una alternativa no del todo diferente que sé que conoce como: Arreglos Ortogonales y las Gráficas Lineales. La herramienta utilizada normalmente son diseños Factoriales fraccionados, sin embargo, cuando el número de factores se ve incrementado, las posibles interacciones aumentan, así como las complicaciones para identificar cuáles son las condiciones específicas a experimentar. Un arreglo ortogonal se puede comparar con una replicación factorial fraccionada, de manera que conserva el concepto de ortogonalidad y contrastes. Un experimento factorial fraccionado es también un arreglo ortogonal. Taguchi desarrolló una serie de arreglos particulares que denominó:  $L_a(b)^c$ ; donde: **a**, representa el número de pruebas o condiciones experimentales que se tomarán. Esto es el número de renglones o líneas en el arreglo, **b**, representa los diferentes niveles a los que se

tomará cada factor y **C**, es el número de efectos independientes que se pueden analizar, esto es el número de columnas.

Los pasos para un diseño de experimentos de parámetros en el caso de menor son mejor son:

- 1.- Seleccionar una característica de calidad de salida a ser optimizada.
- 2.- Seleccionar factores de control y sus niveles, identificando sus posibles interacciones.
- 3.- Seleccionar los factores de ruido y sus niveles; si son demasiados combinarlos en dos o tres factores combinados.
- 4.- Seleccionar los arreglos interno y externo adecuados; asignar los factores de control al arreglo interno y los factores de ruido al arreglo externo.
- 5.- Realizar los experimentos.
- 6.- Realizar análisis estadístico con base en S/N para identificar los niveles de los factores de control óptimos. Algunas veces ayuda realizar un estudio de la interacción entre factores de control y de ruido.
- 7.- Realizar análisis estadístico con base en las medias para identificar los niveles de los factores de control óptimos que ajustan a la respuesta promedio en el nivel deseado. Si hay conflicto entre los niveles de los factores para maximizar la relación S/N y ajustar la media, dar prioridad a los que sirven para maximizar la relación S/N.
- 8.- Predecir el desempeño de salida óptimo con base en una combinación óptima de niveles de factores de control y realiza un experimento confirmatorio.

## CAPITULO 5.- RESULTADOS OBTENIDOS

### 5.1.- Descripción de Factores, Niveles y Arreglo Ortogonal Utilizado.

Para la realización de este experimento se utilizó un torno CNC, un acelerómetro, un medidor de rugosidad y barras de acero al carbón. Las variables de respuesta investigadas fueron la rugosidad o acabado superficial, la vibración axial y tangencial. Los valores de cada factor de control y sus niveles se muestran en la tabla 5.1.

Tabla 5.1.- Valores y factores de control utilizados.

	NIVELES			
FACTORES	1	2	3	UNIDAD
BURIL	WC	HSS		
MATERIAL	1045	1018	4140	
VELOCIDAD	123	212	322	RPM
AVANCE	10	13	26	MILESIMAS
PRODUNDIAD	5	10	15	MILESIMAS

Se utilizó un diseño de Taguchi con el arreglo ortogonal:  $L_{18}(2^1 3^4)$ , como se muestra en la tabla 5.2. Se realizaron 18 corridas experimentales con dos replicas cada corrida. Los resultados obtenidos se muestran en LA tabla 5.3.

Tabla 5.2.- Arreglo ortogonal, factores y niveles.

RUN	A	B	C	D	E	BURIL	MATERIAL	VELOCIDAD	AVANCE	PROFUNDIDAD
1	1	1	1	1	1	1	1045	123	10	5
2	1	1	2	2	2	1	1045	212	13	10
3	1	1	3	3	3	1	1045	322	26	15
4	1	2	1	1	2	1	1018	123	10	10
5	1	2	2	2	3	1	1018	212	13	15
6	1	2	3	3	1	1	1018	322	26	5
7	1	3	1	2	1	1	4140	123	13	5
8	1	3	2	3	2	1	4140	212	26	10
9	1	3	3	1	3	1	4140	322	10	15
10	2	1	1	3	3	2	1045	123	26	15
11	2	1	2	1	1	2	1045	212	10	5
12	2	1	3	2	2	2	1045	322	13	10
13	2	2	1	2	3	2	1018	123	13	15
14	2	2	2	3	1	2	1018	212	26	5
15	2	2	3	1	2	2	1018	322	10	10
16	2	3	1	3	2	2	4140	123	26	10
17	2	3	2	1	3	2	4140	212	10	15
18	2	3	3	2	1	2	4140	322	13	5

Tabla 5.3. - Resultados obtenidos para el arreglo L18(2<sup>5</sup>1 3<sup>4</sup>).

RUN	AXIAL-1	AXIAL-2	TANG-1	TANG-2	RIG-1	RUG-2	S/R AX	S/R TAN	S/R RUG
1	0.16	0.13	0.28	0.21	10.32	7.12	16.72641066	12.1289391	-18.95413705
2	0.07	0.15	0.28	0.54	10.94667	8.623333333	18.63279433	7.32828272	-19.87199972
3	0.06	0.06	0.15	0.2	13.08333	5.306666667	24.43697499	15.0514998	-19.98552088
4	0.08	0.02	0.11	0.2	9.726667	8.493333333	24.68521083	15.8419227	-19.21022188
5	0.04	0.03	0.1	0.34	12.4	12.71	29.03089987	12.0204036	-21.97699622
6	0.03	0.11	0.18	0.13	7.133333	7.74	21.87086643	16.0818308	-17.43478581
7	0.07	0.13	0.35	0.12	13.58667	8.13	19.62573502	11.6462655	-20.98114656
8	0.11	0.09	0.46	0.3	11.02667	12.05666667	19.95678626	8.21598658	-21.25400888
9	0.04	0.11	0.1	0.34	8.996667	9.883333333	21.64309429	12.0204036	-19.50900792
10	0.09	0.24	0.23	0.33	8.723333	10.16333333	14.83464626	10.9205148	-19.52767965
11	0.04	0.11	0.28	0.16	9.36	9.103333333	21.64309429	12.8399666	-19.30644149
12	0.1	0.1	0.25	0.28	11.17667	10.99333333	20	11.52119	-20.89501092
13	0.09	0.11	0.12	0.18	9.95	10.28333333	19.95678626	16.3078414	-20.10192736
14	0.13	0.08	0.12	0.2	14.52	12.04	19.33674075	15.654311	-22.50166183
15	0.03	0.04	0.09	0.07	14.98333	12.27	29.03089987	21.8708664	-22.73062854
16	0.17	0.08	0.2	0.13	6.683333	7.076666667	17.5325529	15.4591773	-16.75531601
17	0.11	0.16	0.12	0.2	7.133333	7.143333333	17.24688645	15.654311	-17.07193861
18	0.12	0.05	0.15	0.2	7.75	6.536666667	20.73143291	15.0514998	-17.1092303

## 5.2.- Análisis de los Datos con relaciones Señal/Ruido y ANOVA.

En la figura 5.1 se muestra el análisis de los datos por medio de graficas de efectos principales para medias y para la señal ruido (S/R) de la Vibración Axial.

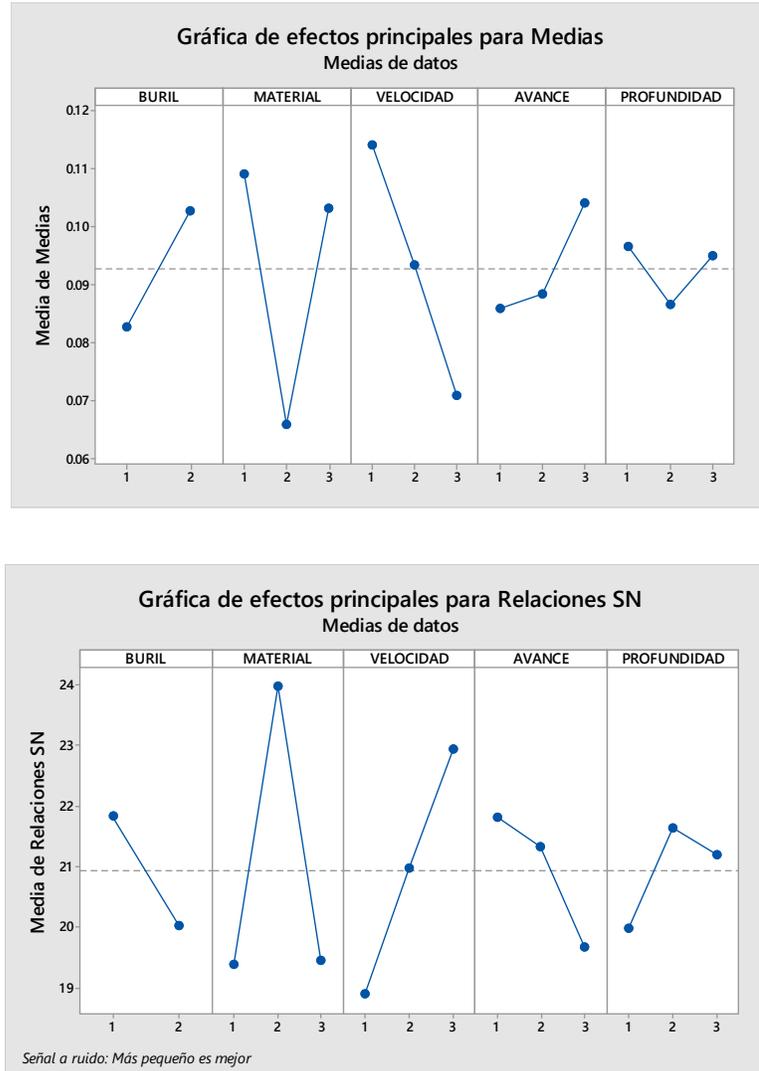


Figura 5.1.- Gráficas de efectos principales para Medias y S/R en vibración Axial.

En base a la relación señal ruido S/R, se calculó el grado de contribución de los factores a la variable de respuesta, de la vibración axial. También se realizó la misma actividad para la vibración tangencial y para la rugosidad, y se observa en promedio lo que se muestra en la figura 5.2.

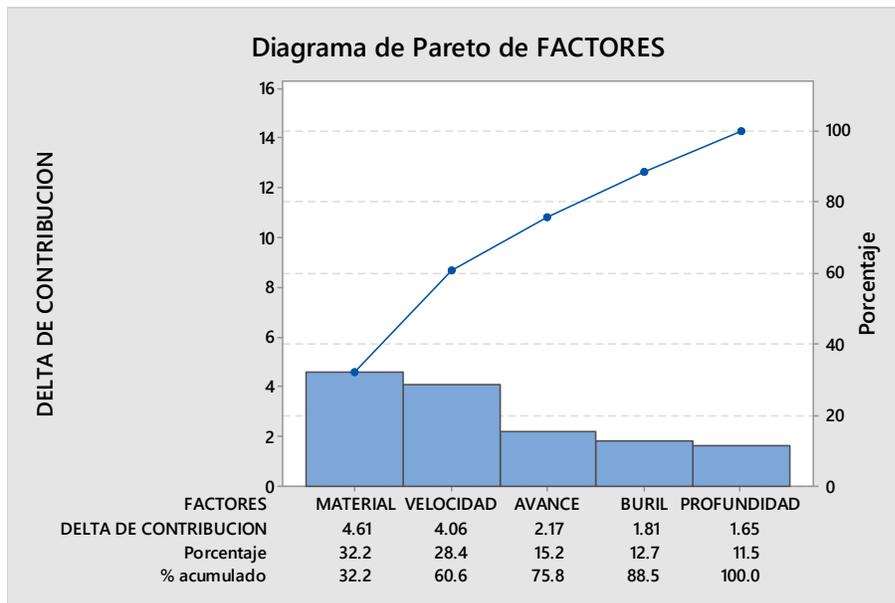


Figura 5.2.- Porcentaje de contribución de los factores experimentales.

En la figura 5.3 se muestra el análisis de los datos por medio de gráficas de efectos principales para la señal ruido (S/R) de la Vibración Tangencial.

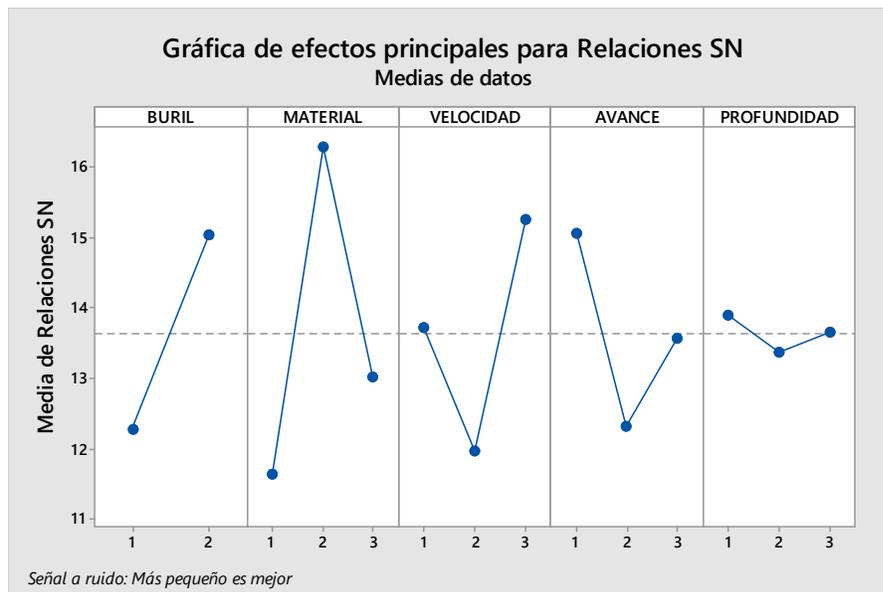


Figura 5.3.- Efectos principales para S/R en vibración Tangencial.

En la figura 5.4 se muestra el análisis de los datos por medio de gráficas de efectos principales para la señal ruido (S/R) para la variable de respuesta “Rugosidad”.

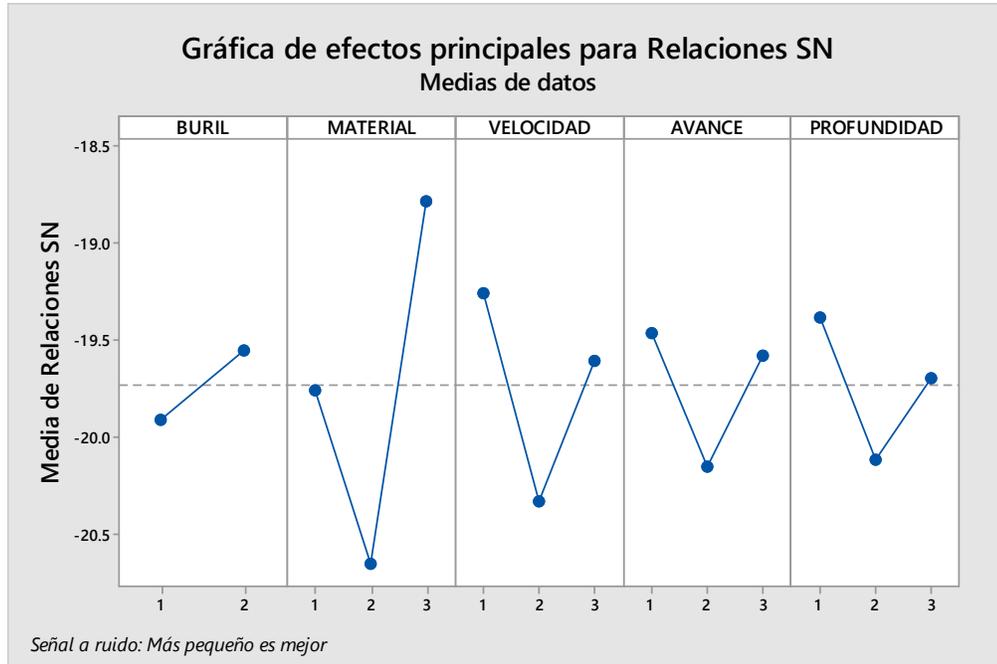


Figura 5.4.- Efectos principales para S/R en cuanto a Rugosidad.

Del análisis de las gráficas anteriores, se concluye que los factores y los niveles recomendados puede ser establecida por una secuencia recomendada, que es en conjunto los valores que optimizarían las variables de respuesta.

Secuencia recomendada: **A1B2C3D1E1**

Lo cual equivale a decir que para obtener los mejores resultados posible. O sea, poca vibración y mejor acabado superficial (menor rugosidad), se requiere utilizar el buril-1, el material 2 (acero al carbón 1018), la velocidad 3 (322 RPM), el avance 1 (10 mm ) y una profundidad de corte de 5 mm. Se identifica también que los factores fuertes son B2 (material), C3 (velocidad) y posiblemente D1 (avance). Ver gráfica de optimización en la figura 5.5.

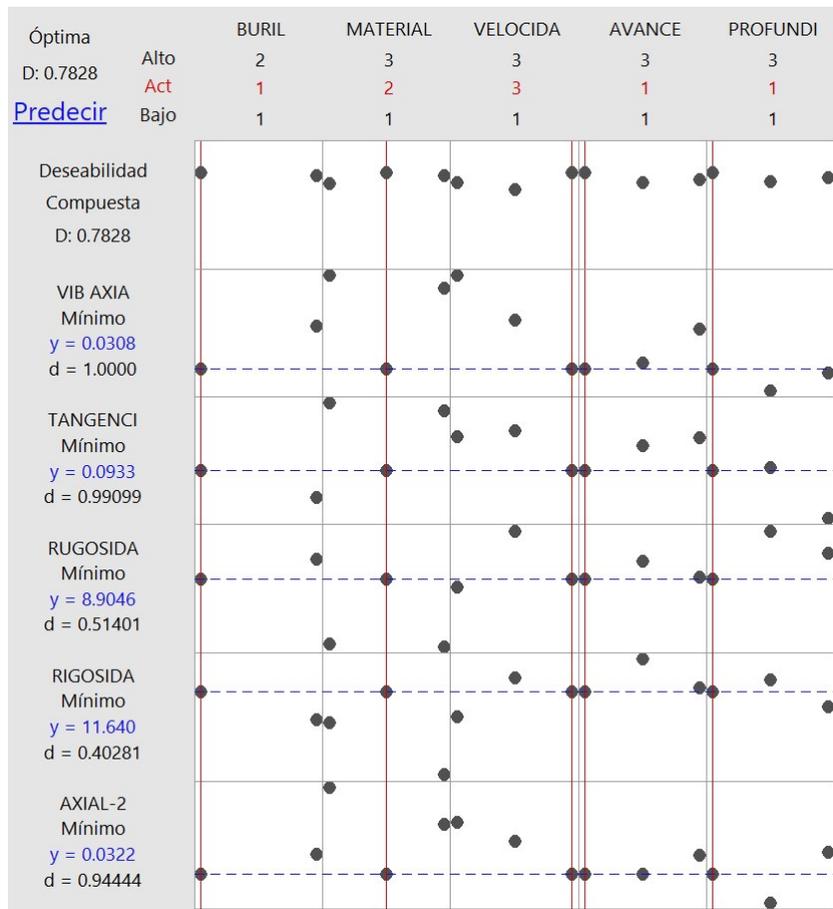


Figura 5.5.- Gráfica de optimización múltiple para las variables de respuesta.

Se realizó también un análisis de varianza para las tres variables de respuesta, en la figura 5.6 se presenta solo el ANOVA para la vibración tangencial. Se concluye de esto que los factores que son más altamente significativos son el material y la velocidad, aunque el p-valor es ligeramente mayor que 0.05, al realizar un desglose por niveles de los factores, se observa que el p-valor para un cierto nivel de material y de velocidad es menor que 0.05. esto nos dice que la evidencia apoya la hipótesis de que al menos un tipo de material y un tipo de velocidad si afectan de manera diferente a las variables de respuesta, como puede verse en la parte media de la figura 5.6. También puede verse la gráfica de residuos del cual se concluye que el modelo es adecuado y se cumplen los requisitos de normalidad, aleatoriedad e independencia.

ANOVA MODELO LINEAL GENERAL: VIBRACION TANGENCIAL					
Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
BURIL	1	0.001800	0.001800	2.18	0.178
<b>MATERIAL</b>	<b>2</b>	<b>0.006636</b>	<b>0.003318</b>	<b>4.02</b>	<b>0.062</b>
<b>VELOCIDAD</b>	<b>2</b>	<b>0.005636</b>	<b>0.002818</b>	<b>4.41</b>	<b>0.055</b>
AVANCE	2	0.001186	0.000593	0.72	0.517
PROFUNDIDAD	2	0.000344	0.000172	0.21	0.816
Error	8	0.006608	0.000826		
Total	17	0.022211			

Coefficientes	EE del			
Término	Coef	coef.	Valor T	Valor p
<b>MATERIAL</b>				
1	0.01639	0.00958	1.71	0.126
2	-0.02694	0.00958	-2.81	<b>0.023</b>
<b>VELOCIDAD</b>				
1	0.02139	0.00958	2.23	<b>0.036</b>
2	0.00056	0.00958	0.06	0.955

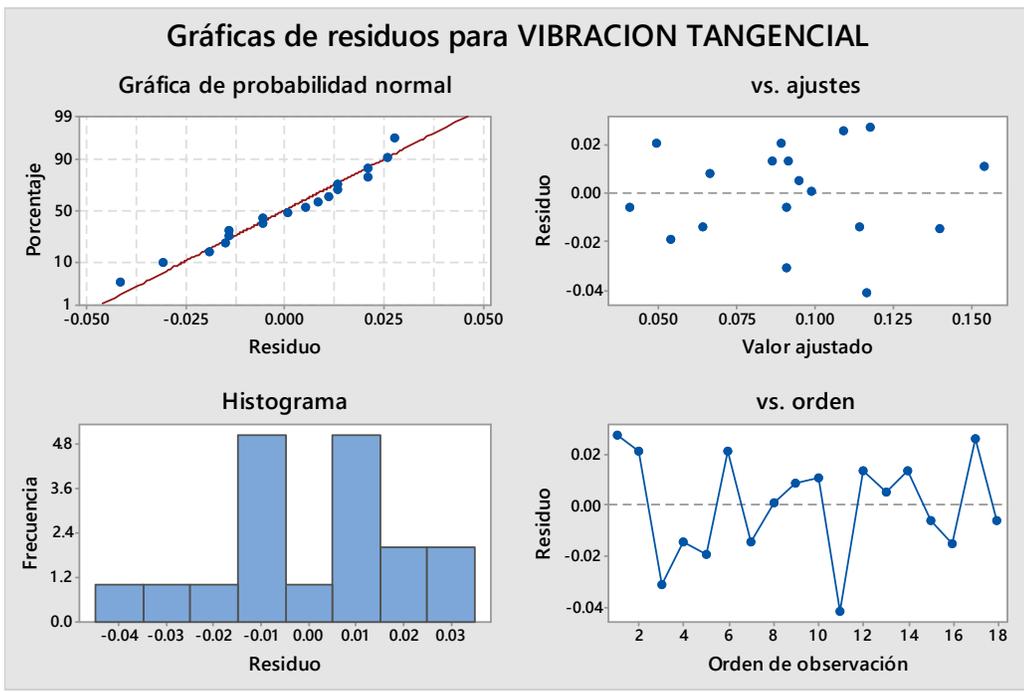


Figura 5.6.- Gráfica de ANOVA y grafica de residuos para Vibración Tangencial.

### 5.3.- Análisis de Regresión y Superficie de Respuesta.

Los modelos de regresión obtenidos para las tres variables de respuesta bajo estudio son:

$$\text{VIBR TANG} = 0.09278 - 0.01000 \text{ BURIL\_1} - 0.02694 \text{ MATERIAL\_2} + 0.00056 \text{ VELOCIDAD\_3}$$

$$\text{VIB AXIAL PROMEDIO} = 0.09278 - 0.02694 \text{ MATERIAL\_2} + 0.02139 \text{ VELOCIDAD\_3}$$

$$\text{RUGOSIDAD PROMEDIO} = 9.810 + 0.039 \text{ BURIL\_1} + 1.210 \text{ MATERIAL\_2} - 0.156 \text{ VELOCIDAD\_3}$$

En la figura 5.7 se puede apreciar las gráficas de uno de estos modelos, donde también se observa claramente los puntos mínimos donde el modelo es óptimo.

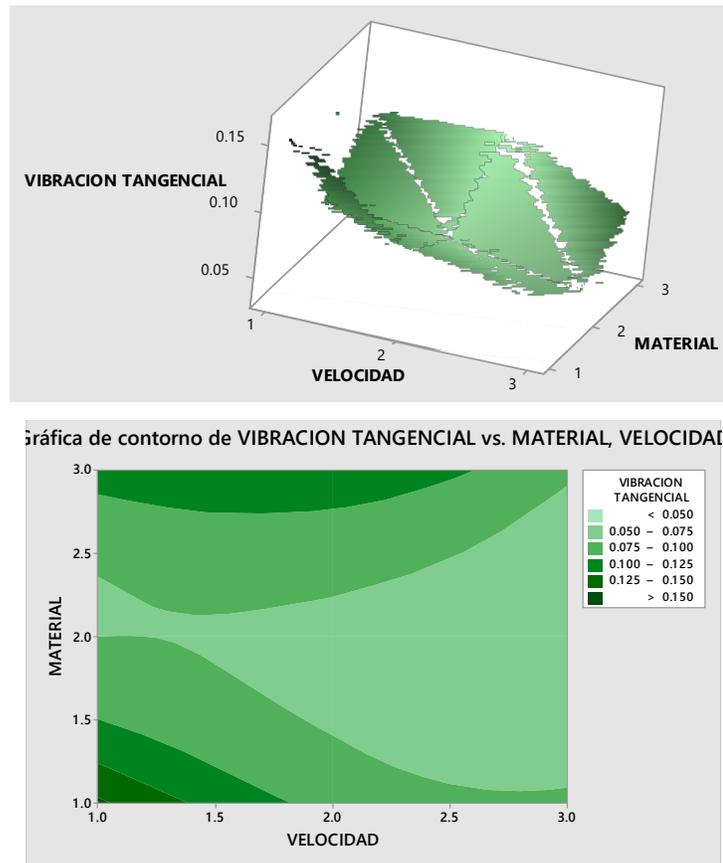


Figura 5.7.- Gráfica de respuesta a la velocidad tangencial y gráfica de contorno velocidad versus material.

Al llevar a cabo el análisis de superficie de respuesta, para optimizar simultáneamente todas las variables dependientes de este estudio, se observaron cosas muy interesantes. Por ejemplo, en el cuadro 4 se muestra el modelo de superficies de respuesta para la vibración axial únicamente y por cuestiones de espacio en este documento. Se observan todos los modelos que son posibles para la vibración axial en combinación de todos los factores y explícitamente con cada nivel de factor.

Tabla 5.4.- Modelo de regresión para superficie de respuesta.

Regresión de superficie de respuesta: VIB AXIAL PR vs. VEL. AVANCE, PROF, BURIL MAT.		
1	1	VIB AXIAL PROMEDIO = 0.1600 - 0.04667 VELOCIDAD + 0.05333 AVANCE + 0.01083 PROFUNDIDAD - 0.01500 VELOCIDAD*VELOCIDAD - 0.008333 AVANCE*AVANCE - 0.009167 PROFUNDIDAD*PROFUNDIDAD + 0.01500 VELOCIDAD*AVANCE + 0.02000 VELOCIDAD*PROFUNDIDAD - 0.01000 AVANCE*PROFUNDIDAD
2	1	VIB AXIAL PROMEDIO = -0.01667 - 0.05833 VELOCIDAD + 0.07333 AVANCE + 0.05750 PROFUNDIDAD - 0.01500 VELOCIDAD*VELOCIDAD - 0.008333 AVANCE*AVANCE - 0.009167 PROFUNDIDAD*PROFUNDIDAD + 0.01500 VELOCIDAD*AVANCE + 0.02000 VELOCIDAD*PROFUNDIDAD - 0.01000 AVANCE*PROFUNDIDAD
1	2	VIB AXIAL PROMEDIO = 0.003333 - 0.01833 VELOCIDAD + 0.05333 AVANCE + 0.01083 PROFUNDIDAD - 0.01500 VELOCIDAD*VELOCIDAD - 0.008333 AVANCE*AVANCE - 0.009167 PROFUNDIDAD*PROFUNDIDAD + 0.01500 VELOCIDAD*AVANCE + 0.02000 VELOCIDAD*PROFUNDIDAD - 0.01000 AVANCE*PROFUNDIDAD
2	2	VIB AXIAL PROMEDIO = -0.1733 - 0.03000 VELOCIDAD + 0.07333 AVANCE + 0.05750 PROFUNDIDAD - 0.01500 VELOCIDAD*VELOCIDAD - 0.008333 AVANCE*AVANCE - 0.009167 PROFUNDIDAD*PROFUNDIDAD + 0.01500 VELOCIDAD*AVANCE + 0.02000 VELOCIDAD*PROFUNDIDAD - 0.01000 AVANCE*PROFUNDIDAD
1	3	VIB AXIAL PROMEDIO = -0.03500 - 0.000000 VELOCIDAD + 0.05333 AVANCE + 0.01083 PROFUNDIDAD - 0.01500 VELOCIDAD*VELOCIDAD - 0.008333 AVANCE*AVANCE - 0.009167 PROFUNDIDAD*PROFUNDIDAD + 0.01500 VELOCIDAD*AVANCE + 0.02000 VELOCIDAD*PROFUNDIDAD - 0.01000 AVANCE*PROFUNDIDAD
2	3	VIB AXIAL PROMEDIO = -0.2117 - 0.01167 VELOCIDAD + 0.07333 AVANCE + 0.05750 PROFUNDIDAD - 0.01500 VELOCIDAD*VELOCIDAD - 0.008333 AVANCE*AVANCE - 0.009167 PROFUNDIDAD*PROFUNDIDAD + 0.01500 VELOCIDAD*AVANCE + 0.02000 VELOCIDAD*PROFUNDIDAD - 0.01000 AVANCE*PROFUNDIDAD

Las gráficas de efectos principales obtenidas para este experimento se pueden ver en la figura 5.8, donde se observa una misma tendencia en todas las gráficas. Las superficies de respuesta para la rugosidad, como ejemplo, se muestran en la figura 5.9.

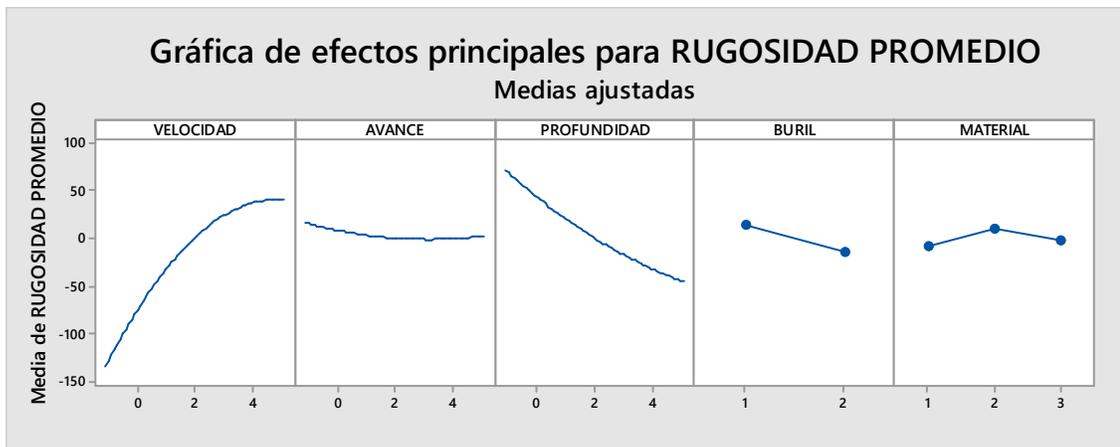
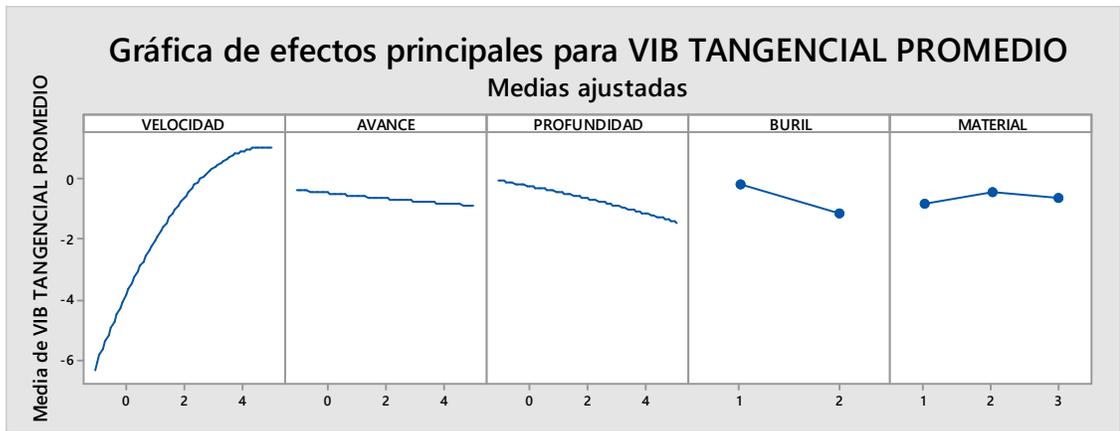
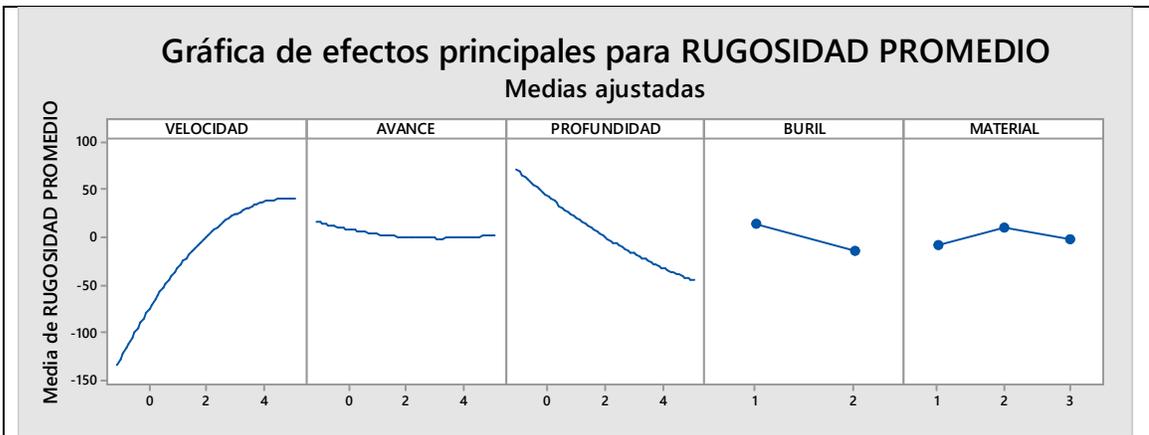
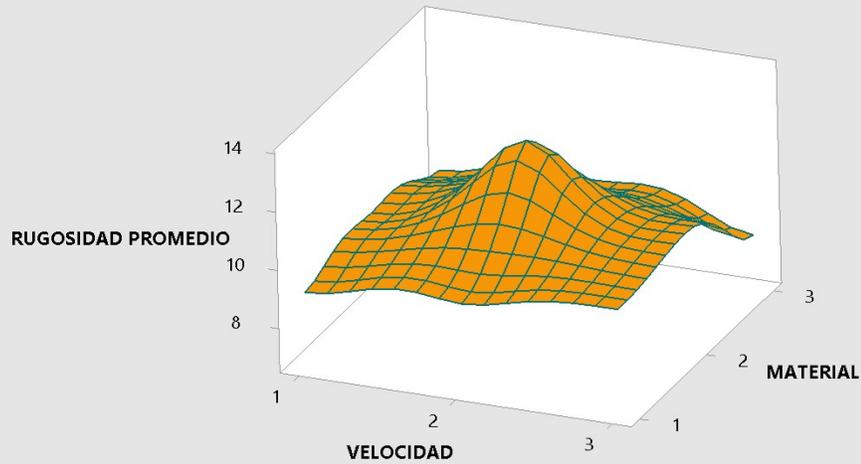
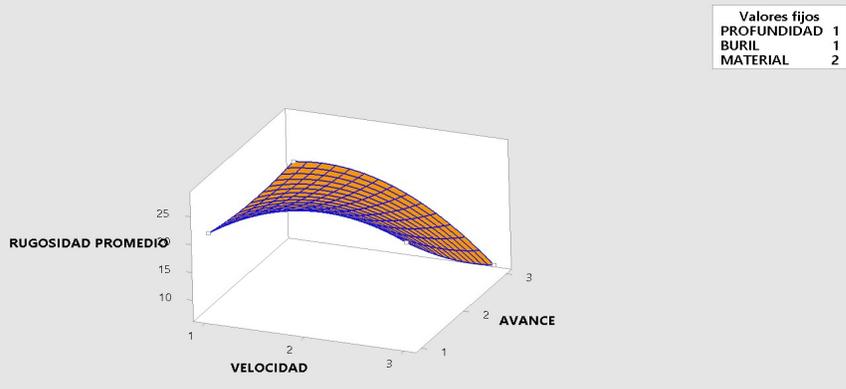


Figura 5.8.- Gráficas de efectos principales.

### Gráfica de superficie de RUGOSIDAD PROMEDIO vs. MATERIAL, VELOCIDAD



### Gráfica de superficie de RUGOSIDAD PROMEDIO vs. AVANCE, VELOCIDAD



### Gráfica de superficie de RUGOSIDAD PROMEDIO vs. PROFUNDIDAD, AVANCE

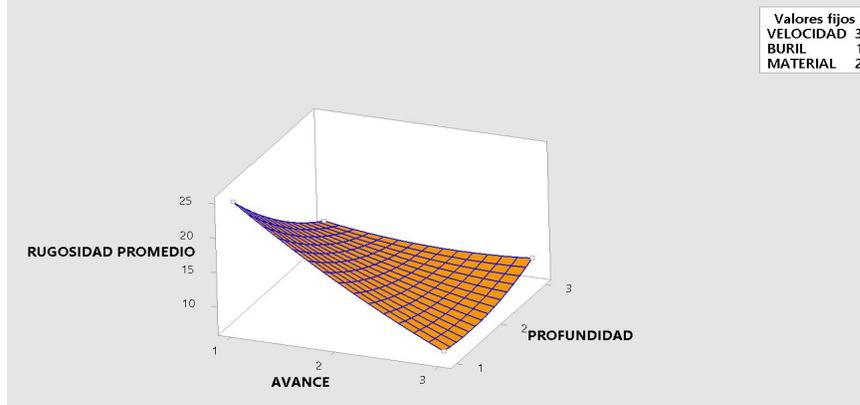


Figura 5.9.- Superficies de respuesta.

Finalmente, en la figura 5.10 se muestra la gráfica de optimización por superficies de respuesta obtenida del MINITAB 18.

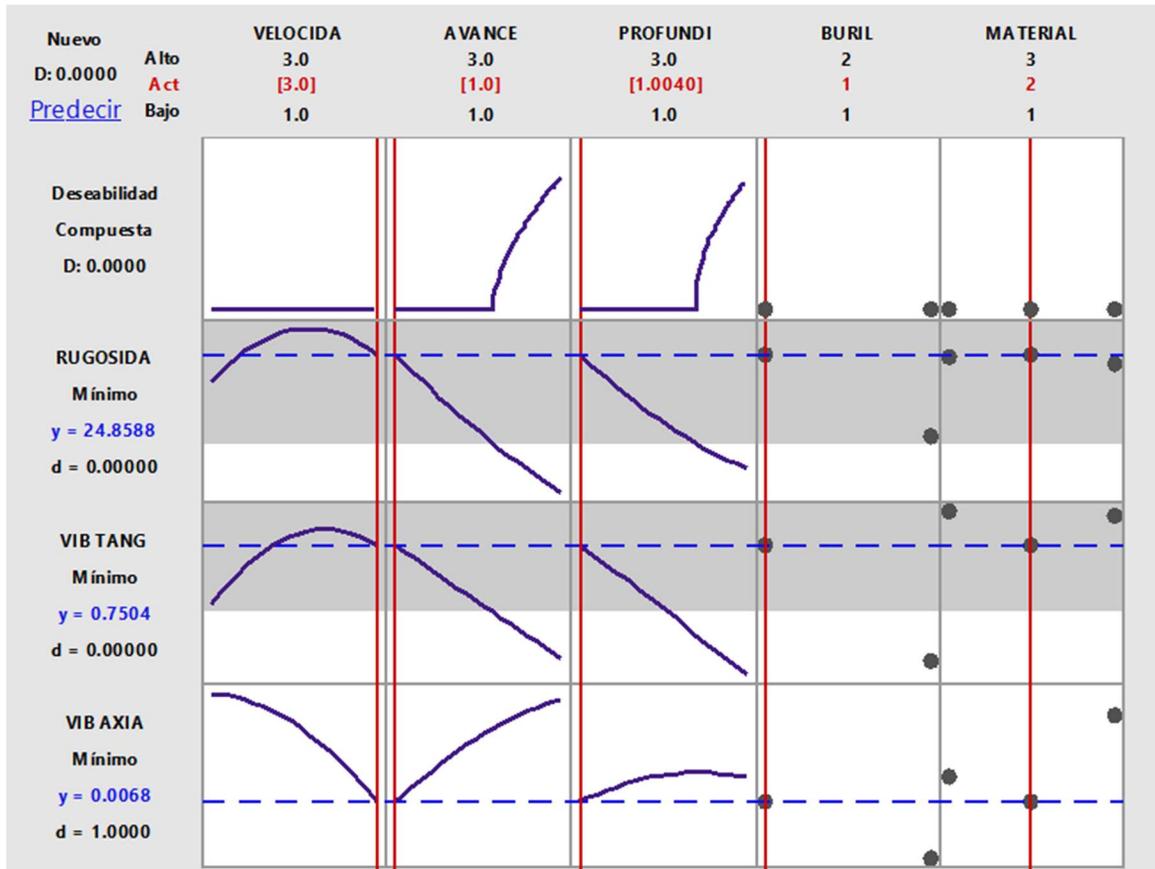


Figura 5.10.- Gráfica de parámetros optimizados por superficie de respuesta.

Se ha observado que la velocidad de corte tiene una contribución máxima en la vibración de la herramienta de corte en ambas direcciones. La variación de la vibración de la herramienta de corte con los parámetros de mecanizado se modeló matemáticamente utilizando el método de análisis de regresión. El valor predicho del modelo desarrollado y los valores experimentales se encuentran muy próximos entre sí, lo que justifica la importancia del modelo. Las ejecuciones de confirmación demuestran que el resultado optimizado y los valores obtenidos a través del análisis de regresión están dentro del límite determinado.

La Ecuación de pronóstico determinada para los factores fuertes encontrados puede definirse como: **PRONOSTICO= PROMEDIO EXPERIMENTAL -B2 -C3**. Al realizar una prueba confirmatoria de tres piezas y realizar los cálculos respectivos para las variables de respuesta, encontramos que en promedio se obtuvieron una vibración axial sea de 0.093 mm; vibración tangencial de 0.66 mm; y una rugosidad, de 0.071 micras (1  $\mu\text{m}$ ). Con lo que se concluye que los resultados esperados fueron de acuerdo a los modelos previamente establecidos.

#### **5.4.- Discusión de Resultados.**

La velocidad de corte más alta parece ser la mejor opción para obtener un bajo valor de acabado superficial y, por lo tanto, hace que el proceso sea robusto a la velocidad de corte en particular. Se ha encontrado que la velocidad de corte es el efecto más significativo para producir un valor bajo de la rugosidad media de la superficie debido a la velocidad de las virutas, es más rápida a una velocidad de corte alta que a una velocidad de corte baja. Se obtiene un buen acabado superficial. La rugosidad de la superficie producida en la operación de torno depende de la velocidad de avance, y el tipo de material. Ghani et al. (2014).

Se ha observado que la velocidad de corte tiene una contribución máxima en la vibración de la herramienta de corte en ambas direcciones. La variación de la vibración de la herramienta de corte con los parámetros de mecanizado se modeló matemáticamente utilizando el método de análisis de regresión. El valor predicho del modelo desarrollado y los valores experimentales se encuentran muy próximos entre sí, lo que justifica la importancia del modelo. Las ejecuciones de confirmación demuestran que el resultado optimizado y los valores obtenidos a través del análisis de regresión y superficie de respuesta, están dentro del límite determinado.

El uso de la relación S/R para seleccionar los mejores niveles de combinación para el valor de rugosidad de la superficie sugiere el uso de un valor bajo de velocidad

de avance para obtener un buen acabado. Por lo tanto, es preferible establecer la profundidad de corte en un valor bajo. La combinación de velocidad de corte y profundidad de corte determina la sección de viruta no deformada y, por lo tanto, la cantidad de energía requerida para eliminar un volumen específico de material. La fuerza requerida para formar las virutas depende de la resistencia del material de trabajo en condiciones en la zona de corte. Aravind M. and Periyasammy S. (2014). Se recomienda el uso de alta velocidad de corte, bajo avance y utilizar el material tipo 3, dado que la baja profundidad de avance de la velocidad de avance conduce a un valor menor de la fuerza de corte resultante en el rango de prueba específico. El experimento de torneado final muestra que el uso de alta velocidad de corte, baja velocidad de avance y baja profundidad de corte conduce a un mejor acabado de la superficie. Pratyusha J. and Ashok H.U. (2013).

## CAPITULO 6.-CONCLUSIONES y RECOMENDACIONES

1. Los procesos de mejora continua son importantes para la evolución de una empresa y el diseño de experimentos y herramientas estadísticas como metodologías de resolución de problemas son enfoques efectivos capaces de mejorar el proceso de fabricación de piezas metálicas en tornos CNC, al reducir la cantidad de piezas defectuosas y mejorar la calidad en su manufactura.
2. En función de la relación Señal/Ruido (S/R) cuando “más pequeño es mejor”, podemos decir que la mejor condición de corte óptima, de factores y los niveles recomendados, nos lleva a la Secuencia Recomendada: A1B2C3D1E1. Lo cual equivale a decir que para obtener los mejores resultados posibles, o sea, poca vibración y mejor acabado superficial (menor rugosidad), se requiere utilizar el buril-1, el material 2 (acero al carbón 1018), la velocidad 3 (322 RPM), el avance 1 (10 mm) y una profundidad de corte de 5 mm. Se identifica también que los factores fuertes son B2 (material), C3 (velocidad) y posiblemente D1 (avance).
3. El análisis de varianza (ANOVA) demuestra que la velocidad de corte tiene la mayor influencia en la evolución del nivel de vibración de la herramienta de corte. En base a la relación señal ruido S/R, se calculó el grado de contribución de los factores a la variable de respuesta, de la vibración axial. También se realizó la misma actividad para la vibración tangencial y para la rugosidad, y se observa en promedio que la velocidad y el tipo de material contribuyen en un 60% de la variación mostrada. Si consideramos el avance, sería de hasta un 80%. Los valores pronosticados de RMS de la vibración para la dirección axial y tangencial usando el análisis de regresión fueron muy cercanos a los valores experimentales, lo que sugiere que el modelo de regresión también es válido para la estimación de la vibración de la herramienta.

4. El método de diseño de matriz ortogonal robusto de Taguchi es adecuado para analizar el problema de la rugosidad de la superficie (corte de metal) como se describe en este documento. Se encontró que el diseño de parámetros del método de Taguchi proporciona una metodología simple, sistemática y eficiente para la optimización de los parámetros de corte. La rugosidad de la superficie se puede mejorar simultáneamente a través de este enfoque en lugar de usar el criterio de ingeniería. Los experimentos de confirmación se realizaron para verificar los parámetros de corte óptimos. Las desviaciones entre la relación S/R real y predicha de la rugosidad de la superficie son pequeñas en cada parámetro.
  
5. La abundancia de metodologías de calidad y operaciones, han surgido durante el paso del tiempo, tratando de buscar aplicaciones y la generación de cambios significativos en los organismos en donde se encuentran o se pretenden implementar; cada una de ellas con esencia, reglas y vocabulario propios, buscando justificar su efectividad al desarrollar ventajas competitivas en diferentes parámetros organizacionales.
  
6. Como nuevas líneas de investigación se recomiendan: optimización multi respuesta, funciones de deseabilidad, regresión no lineal, algoritmos genéticos, tecnologías de manufactura 4.0, redes neuronales, procesamiento digital, sensores para internet de las cosas, entre muchas otras. Ver por ejemplo la publicación periódica de "*Statistics, Optimization and Information Computing*".

## CAPITULO 7.- BIBLIOGRAFIA.

- AAIG. (2010). Measurement System Analysis, 4TH Edition, USA.  
<https://www.aiag.org/>
- Abhang, L.B. and Hameedullah M. (2012). Optimization of Machining Parameters in Steel Turning Operation by Taguchi Method , International Conference on Modelling, Optimization and Computing , Procedia Engineering 38, 40 – 48.
- Alauddin M. Baradie M.A. Hashmi M.S.J. (1997). Prediction of tool life in end milling by response surface methodology, J. Mater Process Technol. 71.
- Aminollah M., Alireza F., Ehsan E., Davoud K. (2008). Statistical analysis of wire electrical discharge turning on material removal rate, Journal of Materials Processing Technology, 205, 283-289.
- Aravind M. and Periyasammy S. (2014). Optimization of Surface Grinding process parameters by Taguchi method and response Surface methodology , International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT) ISSN: 22780181.
- Asiltürk I. Akkuş H. (2011). Determining the effect of cutting parameters on surface roughness in hard turning using the Taguchi method, Measurement 44.
- Barsalou M. (2016). Train and Effective Six Sigma training requires dedication, planning and coaching. Six Sigma Forum Magazine, ASQ, Volume 15, Number 4, USA.
- Barsalou M., Perkin R. (2015). The basics of implementing Six Sigma for root cause analysis. Six Sigma Forum Magazine, ASQ, Volume 14, Number 4, USA.
- Box, G. E. P. (1993). "Quality improvement. The new industrial revolution", *International Statistical Review*, 61, 3-19.
- Byrne G, Dornfeld D, Insaki I, Ketteler G, König W, Teti R Tool condition monitoring (TCM) – The status of research and industrial application. Annals of CIRP (1995) 44(2):541–567
- Camposeco Negrete C. (2015). Optimization of cutting parameters using response surface method for minimizing energy consumption and maximizing cutting quality in turning of AISI 6061 T6 aluminum, J. Clean Prod 91.

- Cook, T. D. y Reichardt, Ch. S. (1982). Métodos cualitativos y cuantitativos en investigación evaluativa, Ed. Morata, Madrid.
- Creswell, J. (2013). Research design: Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches (4a.ed.). Thousand Oaks, CA, EE. UU. SAGE.
- De la Vara, R. y J. Domínguez (2002). Métodos de superficie de multirrespuesta: un estudio comparativo. *Revista Matemática: Teoría y Aplicaciones* 9, 47-65.
- DEVORE JAY L. (2012). PROBABILIDAD Y ESTADISTICA PARA INGENIERIA Y CIENCIAS, 8ª Edición, CENGAGE LEARNING, Mexico.
- Dimla D.E., Sensors signals for tool-wear monitoring in metal cutting operations - A Review of methods. *International Journal of Machine tools and Manufacture*, (2000); 40: 1073–1098.
- Dittrich M. Dix M. Kuhl M. Palumbo B. Tagliaferri F. (2014). Process analysis of water abrasive fine jet structuring of ceramic surfaces via design of experiment, *Procedia CIRP* 14.
- Fisher R.A. (1935). The design of experiments, Oliver and Boyd, Edinburgh.
- Fornasier M. and Trelat E. (2014). Optimizing the Parameters of Surface Roughness on Turning of Al-SiCGr Hybrid Composites, *Rev. Tec. Ing. Univ. Zulia*, Vol. 37, No1, 25–30.
- Frankowiak M., Grosvenor R. and Prickett P., A review of the evolution of microcontroller-based machine and process monitoring. *International Journal of Machine Tools & Manufacturing*, (2005); 45: 578-582.
- Ghani J.A., Choudhury I.A. and Hassan H.H. (2014). Application of Taguchi method in the optimisation of end milling parameters, *Journal of Materials Processing Technology* 145 (2014) 84–92.
- Ghasempoor A, Jeswiet J, Moore TN, Real time implementation of on line tool condition monitoring in turning. *Int j machine tools manufacturing* (1999) 39:1883–1902
- Grech P. (2001). Introducción a la Ingeniería: un enfoque a través del diseño, 2ª Edición, Pearson, México
- Groover Mikell P. (2015). Automation, Production Systems, and Computer-Integrated Manufacturing

- Groover Mikell P. (2015). Introducción a los procesos de manufactura, 1ª Edición, McGraw-Hill, ISBN: 9786071512086.
- Gupta R., Verma P.L. and Jain S. (2018). Lighting the Way-Using Six Sigma and Shainin Sistem tools, SIX SIGMA FORUM MAGAZINE, USA.
- Gutiérrez Pullido H. (2014). Calidad Total y Productividad, 4ª edición, McGraw-Hill, México.
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2014). Metodología de la investigación, 6a. edición, McGraw-Hill, Mexico.
- Hernandez, L.W. (2011). Estudio experimental del desgaste del flanco y las fuerzas de corte en el torneado en seco de alta velocidad del acero AISI 1045, Departamento de Ingeniería Mecánica, Cuba, Universidad de Holguín.
- Jemielniak K. Commercial tool condition monitoring systems. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, (1999), 15 (4): 711–721.
- Kachar, R. N. (1985). “Off-line quality control, parameter design and the Taguchi method”. *Journal of Quality Technology*, 17, pp. 176-209.
- Kanlayasiri K. Boonmung S. (2007). Effects of wire-EDM machining variables on surface roughness of newly developed DC 53 die steel: design of experiments and regression model. *J. Mater. Process Technol.*
- Khuri, A.I. y Cornell, J. A. Response surfaces. Marcel Decker, 1987. Lindgre, B.W. Statistical Theory. Chapman Hall, 1993.
- Kirk, R.E. (2013). Experimental design: procedures for the behavioral sciences (3<sup>rd</sup> Ed.). New York, NY: Wadsworth publishing.
- Leone C. D’Addona D. Teti R. (2011). Tool wear modelling through regression analysis and intelligent methods for nickel base alloy machining, *CIRP J Manuf. Sci. Technol* 4.
- Lin, Optimization technique for face milling stainless steel with multiple performance characteristics, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 19(2002) 330–335.
- Lodhi B.K. Agarwal S. (2014). Optimization of machining parameters in WEDM of AISI D3 steel using Taguchi technique, *Procedia CIRP* 14.
- Mahapatra S. and Patnaik Amar. (2006) Optimization of wire electric discharge machining process parameters using genetic algorithm. *Indian Journal of Engineering Material Science*, 13: 494–502.

- Makadia A.J. Nanavati J.I. (2013). Optimization of machining parameters for turning operations based on response surface methodology, Measurement 46.
- Martínez, F., Sánchez, T., Frías, G. y Pinilla, A. (2006). Comportamiento del acabado superficial de la pieza y el desgaste de la herramienta al fresar aluminio con altas velocidades de corte en fresadoras CNC convencionales, Ingeniería Mecánica, Vol. 9.
- Montgomery D.C. (2019). Design and analysis of experiments, Wiley, New York.
- Mukherjee S., Kamala A. and Kumar K. (2016). Optimization of Material Removal Rate During Turning of SAE 1020 Material in CNC Lathe using Taguchi Technique, 12th Global Congress On Manufacturing And Management, Procedia Engineering, 29–35.
- Mukherjee S.N., Basu S.K. (1967). Multiple regression analysis in evaluation of tool wear. Int. J. Mach. Tools Des. Res. 7.
- Myers, R. H., Montgomery, D. C. y Vining, G. G. (2002). *Generalized linear models: With applications in engineering and the sciences*. John Wiley, Nueva York.
- Nithyanandam G.K., Pezhinkattil R. (2014). A Six Sigma approach for precision machining in milling, Procedia Eng. 9.
- Ondina M., Castillo A. (2017). Integrating design thinking and design for lean Six Sigma in the innovation process. Six Sigma Forum Magazine, ASQ, Volume 16, Number 2, USA.
- Pang J.S. Ansari M.N. Zaroog O.S. Ali M.H. Sapuan S.M. (2014). Taguchi design optimization of machining parameters on the CNC end milling process of halloysite nanotube (HNT/Al/Ep) hybrid composite, HBRC J. 10.
- Patel D.K. and Jivani R.J. (2014). Experimental Investigations on Material Removal Rate, Power Consumption and Surface Roughness of EN19 Steels in Turing using Taguchi Method - A Review, International Journal of Engineering Research & Technology, Vol. 3 Issue 2.
- Phadke (1989). Quality Engineering Using Robust Design, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- Pinkus M., Adler M.A. and Riebling N. (2017). Discretion Advised; A DMAIC project improves discrete data documentation in a healthcare setting. Six Sigma Forum Magazine, ASQ, Volume 17, Number 1, USA.

- Pratyusha J. and Ashok H.U. (2013). Optimization of process parameters for milling using Taguchi methods, International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering, Vol.2, No.6: 129-135 (2013) Special Issue of ICETEM.
- Pyzdek, T. and Keller, P.A. (2010), The Six Sigma Handbook: A Complete Guide for Green Belts, Black Belts, and Managers at All Levels, 3rd ed., McGraw-Hill, New York, NY.
- Qehaja N. Jakupi K. Bunjaku A. Bruçi M, Osmani H. (2015). Effect of machining parameters and machining time on surface roughness in dry turning process, Procedia Eng.
- Ramanujam R, Venkatesan K, Saxena V, Joseph P (2014) Modeling and optimization of cutting parameters in dry turning of Inconel 718 using coated carbide inserts, Procedia Mater. Sci. 5.
- Ranjit, K.R. A primer on the Taguchi method, competitive manufacturing series, Van Nostrand Reinhold, New York (1999)
- Rao K.V. Murthy B. Rao N. (2013). Cutting tool condition monitoring by analyzing surface roughness, workpiece vibration and volume of metal removed for AISI 1040 steel in boring, Measurement 46.
- Rao R.V. (2011). Advanced modeling and optimization of manufacturing processes, Springer, London.
- Ryan, T. P. ( 2007 ). Modern Experimental Design, 1st.Edition, John Wiley and Sons, New York.
- Singh R. Khamba J.S. (2007). Taguchi technique for modeling material removal rate in ultrasonic machining of titanium. Mater Sc.i Eng. A.
- Tagliaferri F., Leonardi G., Semmler U., Kuhl M., Palumbo B. (2013). Study of the influences of laser parameters on laser assisted machining processes, Procedia CIRP 8.
- Taguchi, S. Chowdhury, Y. Wu, Taguchi's Quality Engineering Handbook, John Wiley & Sons Inc., New Jersey, (2005).
- Thomas P., Paul K., (2010). *Six Sigma Handbook. The McGraw-Hill.*
- Tsao H.S.J, Patel M.H. (2015). A general intuitive design pattern for optimally sequencing treatment combinations in 2k factorial experiment and a simple estimation algorithm., Comput Ind Eng.

- Vargas Marin, G., Urzúa, D. y Gutiérrez Pulido, H. (2006). Influencia de la mezcla y del curado en la calidad del tabicón elaborado en la Zona Metropolitana Guadalajara. *Ingeniería*, vol.10 núm. 1.
- Weeks B. (2015). Developing real-time design project scheduling using the DMAIC method to boost on-time project delivery. *Six Sigma Forum Magazine*, ASQ, Volume 14, Number 2, USA.
- Xiaoli Li. A brief review: acoustic emission method for tool wears monitoring during turning. *International Journal of Machine tools and Manufacture*, (2002); 42:157–165.
- Yang Y.K. Chuang M.T, Lin S.S. (2009). Optimization of dry machining parameters for high-purity graphite in end milling process via design of experiments methods, *J. Mater Process Technol.*

## APENDICE 1

RESPALDO DEL ANALISIS ESTADISTICO DE LOS RESULTADOS:

### Resultados para: Hoja de trabajo 3. Diseño de Taguchi

Diseño Taguchi de arreglo ortogonal: **L18(2<sup>1</sup> 3<sup>4</sup>)**

Factores: 5      Corridas: 18

### Análisis de Taguchi: AXIAL-1, AXIAL-2

### vs. BURIL, MATERIAL, VELOCIDAD, AVANCE, PROFUNDIDAD

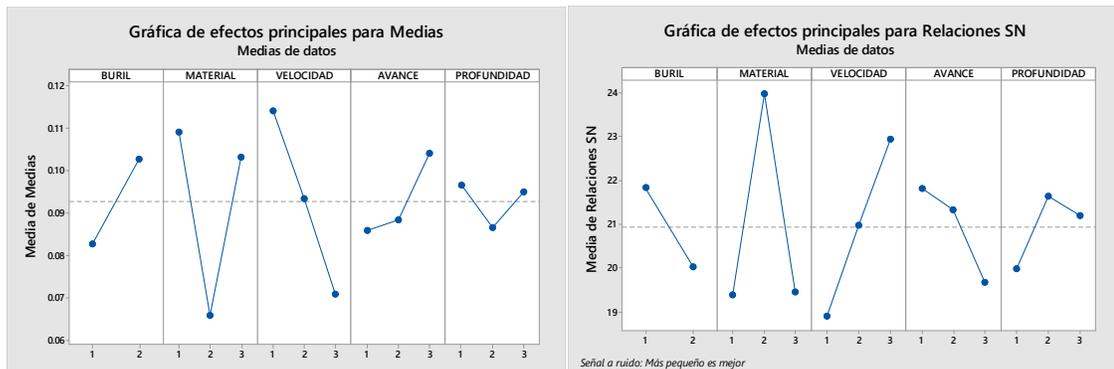
Tabla de respuesta para relaciones de señal a ruido  
Más pequeño es mejor

Nivel	BURIL	MATERIAL	VELOCIDAD	AVANCE	PROFUNDIDAD
1	21.85	19.38	18.89	21.83	19.99
2	20.03	23.99	20.97	21.33	21.64
3		19.46	22.95	19.66	21.19
Delta	1.81	4.61	4.06	2.17	1.65
<b>Clasificar</b>	<b>4</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>5</b>

Tabla de respuesta para medias

Nivel	BURIL	MATERIAL	VELOCIDAD	AVANCE	PROFUNDIDAD
1	0.08278	0.10917	0.11417	0.08583	0.09667
2	0.10278	0.06583	0.09333	0.08833	0.08667
3		0.10333	0.07083	0.10417	0.09500
Delta	0.02000	0.04333	0.04333	0.01833	0.01000
<b>Clasificar</b>	<b>3</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>4</b>	<b>5</b>

### Gráfica de efectos principales para Medias y para Relaciones SN



## Análisis de Taguchi: TANGENCIAL-1, TANGENCIAL-2 vs. BURIL, MATERIAL, VELOCIDAD, AVANCE, ...

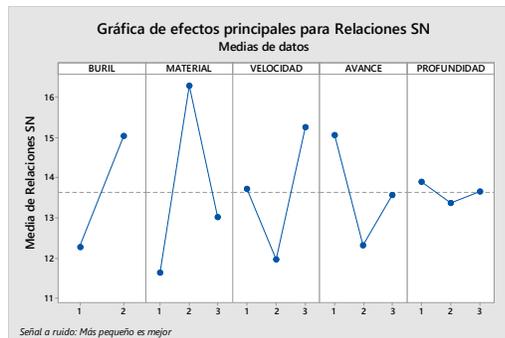
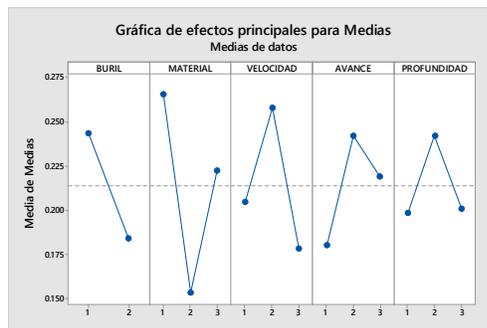
Tabla de respuesta para relaciones de señal a ruido  
Más pequeño es mejor

Nivel	BURIL	MATERIAL	VELOCIDAD	AVANCE	PROFUNDIDAD
1	12.26	11.63	13.72	15.06	13.90
2	15.03	16.30	11.95	12.31	13.37
3		13.01	15.27	13.56	13.66
Delta	2.77	4.66	3.31	2.75	0.53
Clasificar	3	1	2	4	5

Tabla de respuesta para medias

Nivel	BURIL	MATERIAL	VELOCIDAD	AVANCE	PROFUNDIDAD
1	0.2439	0.2658	0.2050	0.1800	0.1983
2	0.1839	0.1533	0.2583	0.2425	0.2425
3		0.2225	0.1783	0.2192	0.2008
Delta	0.0600	0.1125	0.0800	0.0625	0.0442
Clasificar	4	1	2	3	5

## Gráfica de efectos principales para Medias y para Relaciones SN



## Análisis de Taguchi: RIGOSIDAD-1, RUGOSIDAD-2 vs. BURIL, MATERIAL, VELOCIDAD, AVANCE, ...

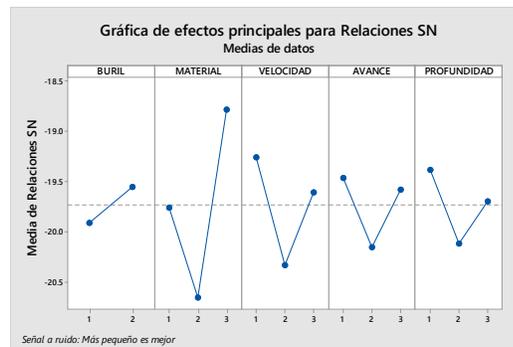
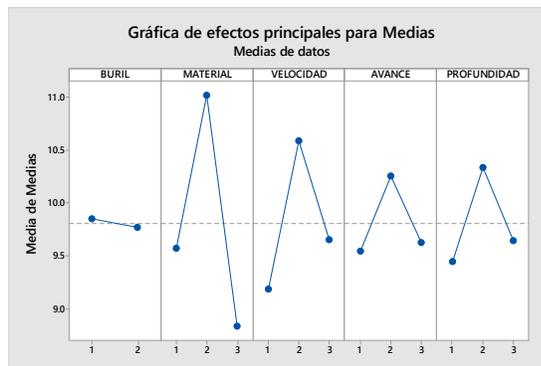
Tabla de respuesta para relaciones de señal a ruido  
 Más pequeño es mejor

Nivel	BURIL	MATERIAL	VELOCIDAD	AVANCE	PROFUNDIDAD
1	-19.91	-19.76	-19.26	-19.46	-19.38
2	-19.56	-20.66	-20.33	-20.16	-20.12
3		-18.78	-19.61	-19.58	-19.70
Delta	0.35	1.88	1.08	0.69	0.74
<b>Clasificar</b>	<b>5</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>4</b>	<b>3</b>

Tabla de respuesta para medias

Nivel	BURIL	MATERIAL	VELOCIDAD	AVANCE	PROFUNDIDAD
1	9.849	9.577	9.188	9.544	9.445
2	9.772	11.021	10.589	10.257	10.338
3		8.834	9.654	9.629	9.648
Delta	0.077	2.187	1.401	0.713	0.893
<b>Clasificar</b>	<b>5</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>4</b>	<b>3</b>

## Gráfica de efectos principales para Medias y para Relaciones SN



**ANOVA MODELO LINEAL GENERAL: RESPUESTA: VIBRACION TANGENCIAL**

**Análisis de Varianza**

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
BURIL	1	0.001800	0.001800	2.18	0.178
MATERIAL	2	0.006636	0.003318	4.02	0.062
VELOCIDAD	2	0.005636	0.002818	3.41	0.085
AVANCE	2	0.001186	0.000593	0.72	0.517
PROFUNDIDAD	2	0.000344	0.000172	0.21	0.816
Error	8	0.006608	0.000826		
Total	17	0.022211			

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
0.0287409	70.25%	36.78%	0.00%

**Coefficientes**

Término	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p	VIF
Constante	0.09278	0.00677	13.70	0.000	
BURIL					
1	-0.01000	0.00677	-1.48	0.178	1.00
MATERIAL					
1	0.01639	0.00958	1.71	0.126	1.33
2	-0.02694	0.00958	-2.81	0.023	1.33
VELOCIDAD					
1	0.02139	0.00958	2.23	0.056	1.33
2	0.00056	0.00958	0.06	0.955	1.33
AVANCE					
1	-0.00694	0.00958	-0.72	0.489	1.33
2	-0.00444	0.00958	-0.46	0.655	1.33
PROFUNDIDAD					
1	0.00389	0.00958	0.41	0.695	1.33
2	-0.00611	0.00958	-0.64	0.541	1.33

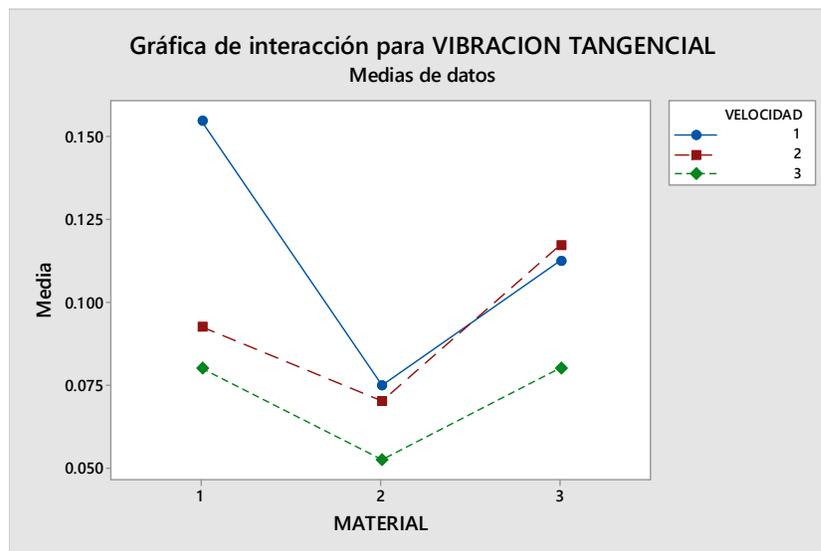
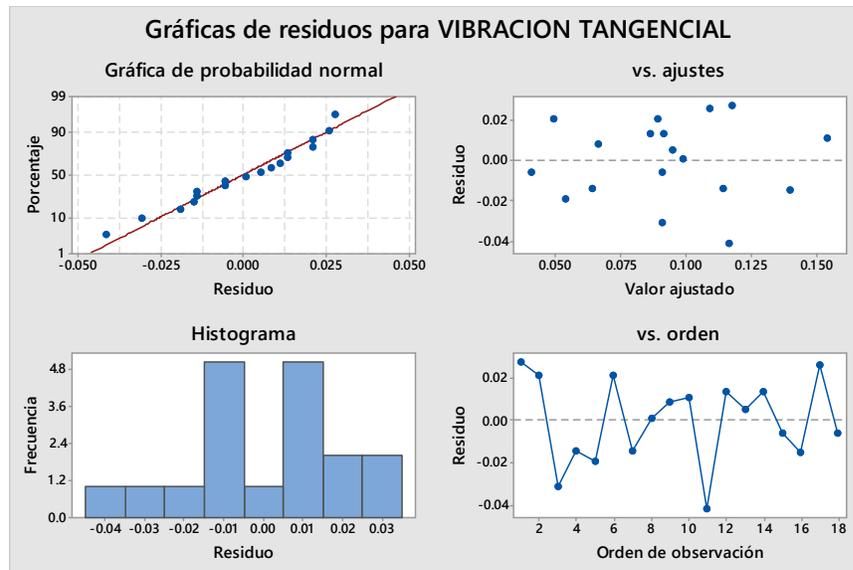
**Ecuación de regresión**

$$\begin{aligned} \text{VIBRACION TANGENCIAL} = & 0.09278 - 0.01000 \text{ BURIL}_1 + 0.01000 \text{ BURIL}_2 \\ & + 0.01639 \text{ MATERIAL}_1 - 0.02694 \text{ MATERIAL}_2 + 0.01056 \text{ MATERIAL}_3 \\ & + 0.02139 \text{ VELOCIDAD}_1 + 0.00056 \text{ VELOCIDAD}_2 - 0.02194 \text{ VELOCIDAD}_3 - \\ & 0.00694 \text{ AVANCE}_1 - 0.00444 \text{ AVANCE}_2 + 0.01139 \text{ AVANCE}_3 + 0.00389 \text{ PROFUNDIDAD}_1 \\ & - 0.00611 \text{ PROFUNDIDAD}_2 + 0.00222 \text{ PROFUNDIDAD}_3 \end{aligned}$$

**Ajustes y diagnósticos para observaciones poco comunes**

Obs	VIBRACION TANGENCIAL	Ajuste	Resid	Resid est.	R
11	0.0750	0.1167	-0.0417	-2.17	R

## Gráficas de residuos para VIBRACION TANGENCIAL



**ANOVA MODELO LINEAL GENERAL: RESPUESTA: VIBRACION AXIAL**

**Modelo lineal general: VIB AXIAL PROMEDIO vs. BURIL, MATERIAL, VELOCIDAD, AVANCE, PROFUNDIDAD**

Método

Codificación de factores (-1, 0, +1)

Información del factor

Factor	Tipo	Niveles	Valores
BURIL	Fijo	2	1, 2
MATERIAL	Fijo	3	1, 2, 3
VELOCIDAD	Fijo	3	1, 2, 3
AVANCE	Fijo	3	1, 2, 3
PROFUNDIDAD	Fijo	3	1, 2, 3

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
BURIL	1	0.001800	0.001800	2.18	0.178
MATERIAL	2	0.006636	0.003318	4.02	0.062
VELOCIDAD	2	0.005636	0.002818	3.41	0.085
AVANCE	2	0.001186	0.000593	0.72	0.517
PROFUNDIDAD	2	0.000344	0.000172	0.21	0.816
Error	8	0.006608	0.000826		
Total	17	0.022211			

Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
0.0287409	70.25%	36.78%	0.00%

Coefficientes

Término	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p	VIF
Constante	0.09278	0.00677	13.70	0.000	
BURIL					
1	-0.01000	0.00677	-1.48	0.178	1.00
MATERIAL					
1	0.01639	0.00958	1.71	0.126	1.33
2	-0.02694	0.00958	-2.81	0.023	1.33
VELOCIDAD					
1	0.02139	0.00958	2.23	0.056	1.33
2	0.00056	0.00958	0.06	0.955	1.33
AVANCE					
1	-0.00694	0.00958	-0.72	0.489	1.33
2	-0.00444	0.00958	-0.46	0.655	1.33
PROFUNDIDAD					
1	0.00389	0.00958	0.41	0.695	1.33
2	-0.00611	0.00958	-0.64	0.541	1.33

Ecuación de regresión

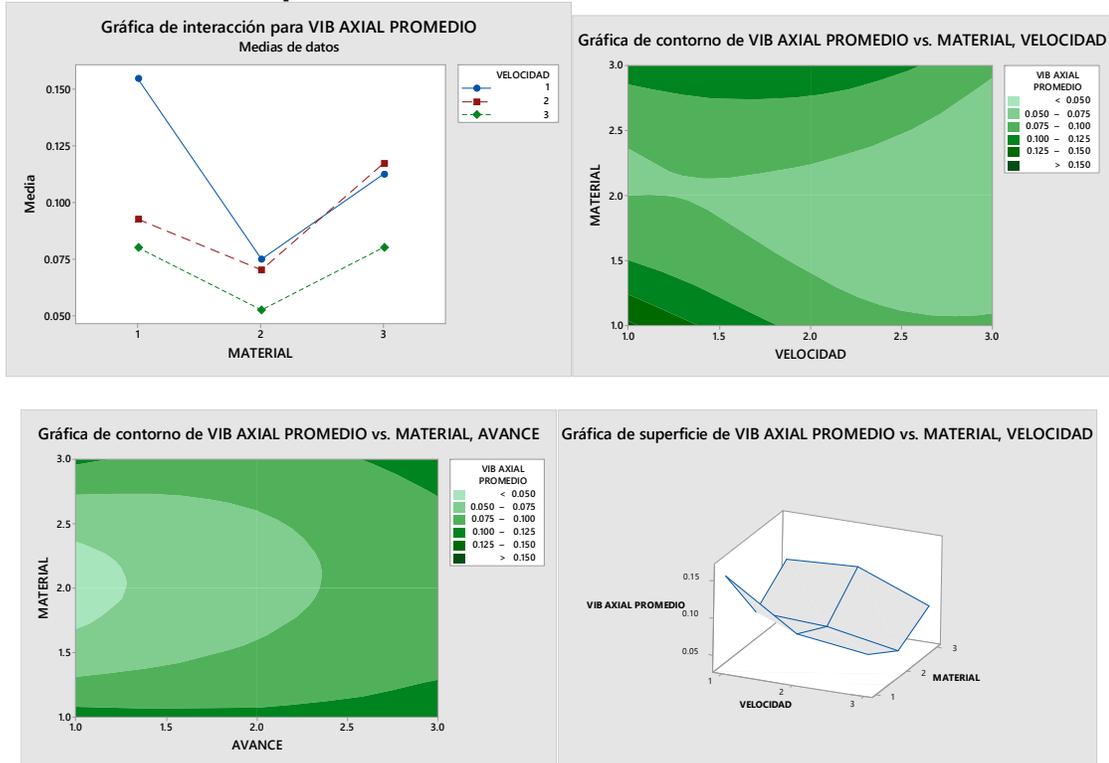
$$\begin{aligned} \text{VIB AXIAL PROMEDIO} = & 0.09278 - 0.01000 \text{ BURIL}_1 + 0.01000 \text{ BURIL}_2 + 0.01639 \text{ MATERIAL}_1 \\ & - 0.02694 \text{ MATERIAL}_2 + 0.01056 \text{ MATERIAL}_3 + 0.02139 \text{ VELOCIDAD}_1 \\ & + 0.00056 \text{ VELOCIDAD}_2 - 0.02194 \text{ VELOCIDAD}_3 - 0.00694 \text{ AVANCE}_1 \\ & - 0.00444 \text{ AVANCE}_2 + 0.01139 \text{ AVANCE}_3 + 0.00389 \text{ PROFUNDIDAD}_1 \\ & - 0.00611 \text{ PROFUNDIDAD}_2 + 0.00222 \text{ PROFUNDIDAD}_3 \end{aligned}$$

Ajustes y diagnósticos para observaciones poco comunes

	VIB AXIAL		Resid	
Obs	PROMEDIO	Ajuste	Resid	est.
11	0.0750	0.1167	-0.0417	-2.17 R

Residuo grande R

## Gráficas de residuos para VIB AXIAL PROMEDIO



**ANOVA MODELO LINEAL GENERAL: RESPUESTA: RUGOSIDAD**

## Modelo lineal general: RUGOSIDAD PROMEDIO vs. BURIL, MATERIAL, VELOCIDAD, AVANCE, PROFUNDIDAD

Método

Codificación de factores (-1, 0, +1)

Información del factor

Factor	Tipo	Niveles	Valores
BURIL	Fijo	2	1, 2
MATERIAL	Fijo	3	1, 2, 3
VELOCIDAD	Fijo	3	1, 2, 3
AVANCE	Fijo	3	1, 2, 3
PROFUNDIDAD	Fijo	3	1, 2, 3

### Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
BURIL	1	0.0270	0.02696	0.00	0.947
MATERIAL	2	14.8434	7.42169	1.30	0.324
VELOCIDAD	2	6.1035	3.05174	0.53	0.605
AVANCE	2	1.8188	0.90938	0.16	0.855
PROFUNDIDAD	2	2.6298	1.31488	0.23	0.799
Error	8	45.6671	5.70839		
Total	17	71.0895			

### Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
2.38922	35.76%	0.00%	0.00%

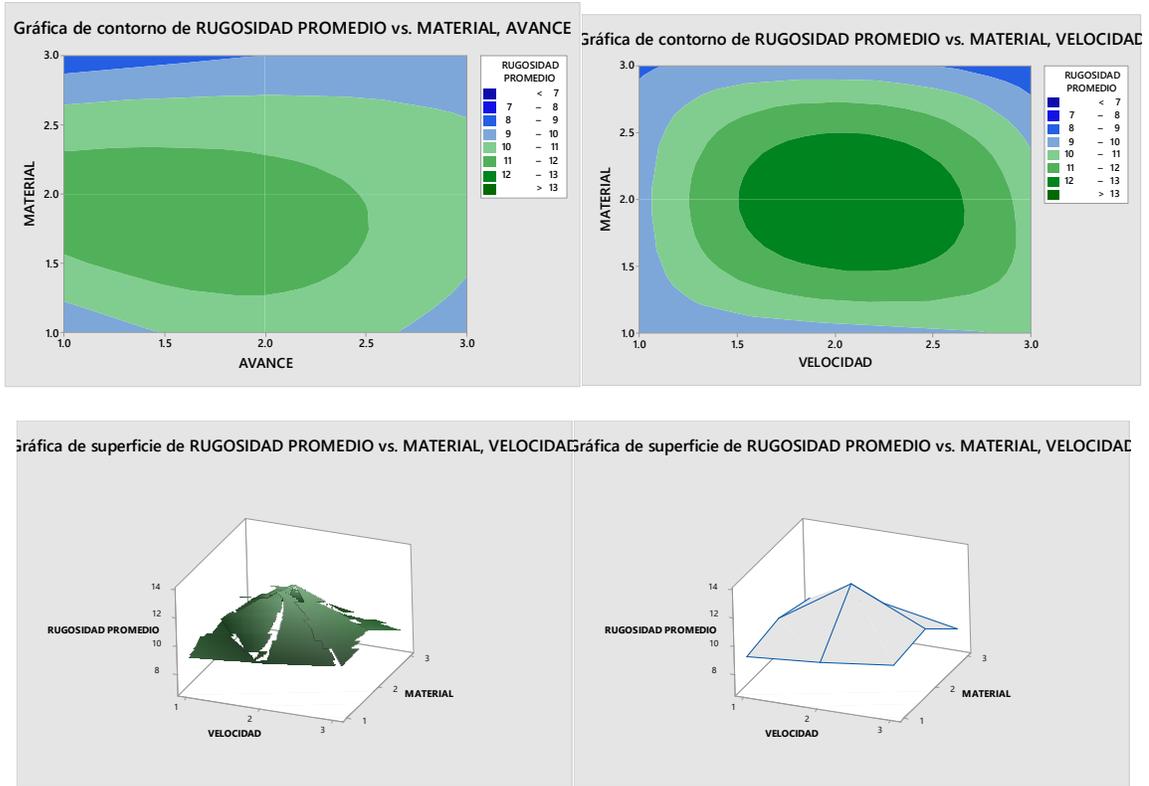
### Coefficientes

Término	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p	VIF
Constante	9.810	0.563	17.42	0.000	
BURIL					
1	0.039	0.563	0.07	0.947	1.00
MATERIAL					
1	-0.234	0.796	-0.29	0.777	1.33
2	1.210	0.796	1.52	0.167	1.33
VELOCIDAD					
1	-0.622	0.796	-0.78	0.457	1.33
2	0.778	0.796	0.98	0.357	1.33
AVANCE					
1	-0.266	0.796	-0.33	0.747	1.33
2	0.447	0.796	0.56	0.590	1.33
PROFUNDIDAD					
1	-0.365	0.796	-0.46	0.659	1.33
2	0.528	0.796	0.66	0.526	1.33

### Ecuación de regresión

$$\begin{aligned}
 \text{RUGOSIDAD PROMEDIO} = & 9.810 + 0.039 \text{ BURIL}_1 - 0.039 \text{ BURIL}_2 - 0.234 \text{ MATERIAL}_1 \\
 & + 1.210 \text{ MATERIAL}_2 - 0.977 \text{ MATERIAL}_3 - 0.622 \text{ VELOCIDAD}_1 \\
 & + 0.778 \text{ VELOCIDAD}_2 - 0.156 \text{ VELOCIDAD}_3 - 0.266 \text{ AVANCE}_1 \\
 & + 0.447 \text{ AVANCE}_2 - 0.181 \text{ AVANCE}_3 - 0.365 \text{ PROFUNDIDAD}_1 \\
 & + 0.528 \text{ PROFUNDIDAD}_2 - 0.162 \text{ PROFUNDIDAD}_3
 \end{aligned}$$

## Gráficas de residuos para RUGOSIDAD PROMEDIO



## Optimización de respuesta: VIB AXIAL PROMEDIO, TANGENCIAL-1, RUGOSIDAD-2, RIGOSIDAD-1, AXIAL-

Parámetros

Respuesta	Meta	Inferior	Objetivo	Superior	Ponderación
Importancia					
VIB AXIAL PROMEDIO	Mínimo		0.03500	0.1650	1
1					
TANGENCIAL-1	Mínimo		0.09000	0.4600	1
1					
RUGOSIDAD-2	Mínimo		5.30667	12.7100	1
1					
RIGOSIDAD-1	Mínimo		6.68333	14.9833	1
1					
AXIAL-2	Mínimo		0.02000	0.2400	1
1					
AXIAL-1	Mínimo		0.03000	0.1700	1
1					
TANGENCIAL-2	Mínimo		0.07000	0.5400	1
1					

Solución

						VIB AXIAL PROMEDIO	TANGENCIAL-
1						Ajuste	
Solución	BURIL	MATERIAL	VELOCIDAD	AVANCE	PROFUNDIDAD		
Ajuste							
1	1	2	3	1	1	0.0308333	
0.0933333							

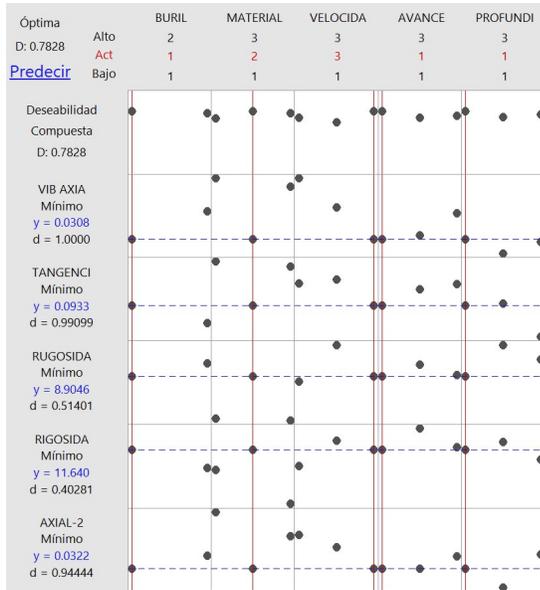
						RUGOSIDAD-2	RIGOSIDAD-1	AXIAL-2	AXIAL-1	TANGENCIAL-2
Deseabilidad						Ajuste	Ajuste	Ajuste	Ajuste	Ajuste
Solución										
compuesta										
1						8.90463	11.64	0.0322222	0.0294444	0.103333
0.782752										

Predicción de respuesta múltiple

Variable	Valor de configuración
BURIL	1
MATERIAL	2
VELOCIDAD	3
AVANCE	1
PROFUNDIDAD	1

Respuesta	Ajuste	EE de ajuste	IC de 95%	IP de 95%
VIB AXIAL PROMEDIO	0.0308	0.0214	(-0.0186, 0.0802)	(-0.0518, 0.1135)
TANGENCIAL-1	0.0933	0.0563	(-0.0365, 0.2232)	(-0.1240, 0.3106)
RUGOSIDAD-2	8.90	1.79	( 4.78, 13.03)	( 2.01, 15.80)
RIGOSIDAD-1	11.64	2.40	( 6.09, 17.19)	( 2.36, 20.92)
AXIAL-2	0.0322	0.0400	(-0.0600, 0.1245)	(-0.1221, 0.1866)
AXIAL-1	0.0294	0.0315	(-0.0431, 0.1020)	(-0.0919, 0.1508)
TANGENCIAL-2	0.1033	0.0683	(-0.0543, 0.2609)	(-0.1604, 0.3671)

## Gráfica de optimización



## Regresión de superficie de respuesta: VIB AXIAL PR vs. VELOCIDAD, AVANCE, PROFUNDIDAD, ...

No se pueden estimar los siguientes términos y se eliminaron:  
 AVANCE\*MATERIAL, PROFUNDIDAD\*MATERIAL, BURIL\*MATERIAL

### Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	17	0.022211	0.001307	*	*
Lineal	6	0.004366	0.000728	*	*
VELOCIDAD	1	0.000001	0.000001	*	*
AVANCE	1	0.000014	0.000014	*	*
PROFUNDIDAD	1	0.000003	0.000003	*	*
BURIL	1	0.000011	0.000011	*	*
MATERIAL	2	0.000082	0.000041	*	*
Cuadrado	3	0.000174	0.000058	*	*
VELOCIDAD*VELOCIDAD	1	0.000016	0.000016	*	*
AVANCE*AVANCE	1	0.000050	0.000050	*	*
PROFUNDIDAD*PROFUNDIDAD	1	0.000061	0.000061	*	*
Interacción de 2 factores	8	0.006608	0.000826	*	*
VELOCIDAD*AVANCE	1	0.000169	0.000169	*	*
VELOCIDAD*PROFUNDIDAD	1	0.000300	0.000300	*	*
VELOCIDAD*BURIL	1	0.000034	0.000034	*	*
VELOCIDAD*MATERIAL	2	0.000245	0.000122	*	*
AVANCE*PROFUNDIDAD	1	0.000006	0.000006	*	*
AVANCE*BURIL	1	0.000013	0.000013	*	*
PROFUNDIDAD*BURIL	1	0.000069	0.000069	*	*
Error	0	*	*		
Total	17	0.022211			

Resumen del modelo

S R-cuad. R-cuad. R-cuad.  
 (ajustado) (pred)  
 \* 100.00% \* \*

Coefficientes codificados

Término	Efecto	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p	VIF
Constante		0.06444	*	*	*	
VELOCIDAD	-0.03500	-0.01750	*	*	*	5476.00
AVANCE	0.08000	0.04000	*	*	*	1392.00
PROFUNDIDAD	0.03500	0.01750	*	*	*	1392.00
BURIL						
1	0.06667	0.03333	*	*	*	1881.00
MATERIAL						
1	0.13444	0.06722	*	*	*	664.00
2	-0.06556	-0.03278	*	*	*	202.67
VELOCIDAD*VELOCIDAD	-0.03000	-0.01500	*	*	*	2842.00
AVANCE*AVANCE	-0.016667	-0.008333	*	*	*	272.22
PROFUNDIDAD*PROFUNDIDAD	-0.018333	-0.009167	*	*	*	272.22
VELOCIDAD*AVANCE	0.03000	0.01500	*	*	*	138.67
VELOCIDAD*PROFUNDIDAD	0.04000	0.02000	*	*	*	138.67
VELOCIDAD*BURIL						
1	0.011667	0.005833	*	*	*	84.00
VELOCIDAD*MATERIAL						
1	-0.05000	-0.02500	*	*	*	373.33
2	0.006667	0.003333	*	*	*	124.44
AVANCE*PROFUNDIDAD	-0.02000	-0.01000	*	*	*	1664.00
AVANCE*BURIL						
1	-0.02000	-0.01000	*	*	*	662.67
PROFUNDIDAD*BURIL						
1	-0.04667	-0.02333	*	*	*	662.67

Ecuación de regresión en unidades no codificadas

BURIL MATERIAL

1 1 VIB AXIAL PROMEDIO = 0.1600 - 0.04667 VELOCIDAD + 0.05333 AVANCE  
 + 0.01083 PROFUNDIDAD - 0.01500 VELOCIDAD\*VELOCIDAD  
 - 0.008333 AVANCE\*AVANCE  
 - 0.009167 PROFUNDIDAD\*PROFUNDIDAD  
 + 0.01500 VELOCIDAD\*AVANCE  
 + 0.02000 VELOCIDAD\*PROFUNDIDAD  
 - 0.01000 AVANCE\*PROFUNDIDAD

2 1 VIB AXIAL PROMEDIO = -0.01667 - 0.05833 VELOCIDAD + 0.07333 AVANCE  
 + 0.05750 PROFUNDIDAD - 0.01500 VELOCIDAD\*VELOCIDAD  
 - 0.008333 AVANCE\*AVANCE  
 - 0.009167 PROFUNDIDAD\*PROFUNDIDAD  
 + 0.01500 VELOCIDAD\*AVANCE  
 + 0.02000 VELOCIDAD\*PROFUNDIDAD  
 - 0.01000 AVANCE\*PROFUNDIDAD

1 2 VIB AXIAL PROMEDIO = 0.003333 - 0.01833 VELOCIDAD + 0.05333 AVANCE  
 + 0.01083 PROFUNDIDAD - 0.01500 VELOCIDAD\*VELOCIDAD  
 - 0.008333 AVANCE\*AVANCE  
 - 0.009167 PROFUNDIDAD\*PROFUNDIDAD  
 + 0.01500 VELOCIDAD\*AVANCE  
 + 0.02000 VELOCIDAD\*PROFUNDIDAD  
 - 0.01000 AVANCE\*PROFUNDIDAD

```

2      2      VIB AXIAL PROMEDIO = -0.1733 - 0.03000 VELOCIDAD + 0.07333 AVANCE
      + 0.05750 PROFUNDIDAD - 0.01500 VELOCIDAD*VELOCIDAD
      - 0.008333 AVANCE*AVANCE
      - 0.009167 PROFUNDIDAD*PROFUNDIDAD
      + 0.01500 VELOCIDAD*AVANCE
      + 0.02000 VELOCIDAD*PROFUNDIDAD
      - 0.01000 AVANCE*PROFUNDIDAD

1      3      VIB AXIAL PROMEDIO = -0.03500 - 0.000000 VELOCIDAD + 0.05333 AVANCE
      + 0.01083 PROFUNDIDAD - 0.01500 VELOCIDAD*VELOCIDAD
      - 0.008333 AVANCE*AVANCE
      - 0.009167 PROFUNDIDAD*PROFUNDIDAD
      + 0.01500 VELOCIDAD*AVANCE
      + 0.02000 VELOCIDAD*PROFUNDIDAD
      - 0.01000 AVANCE*PROFUNDIDAD

2      3      VIB AXIAL PROMEDIO = -0.2117 - 0.01167 VELOCIDAD + 0.07333 AVANCE
      + 0.05750 PROFUNDIDAD - 0.01500 VELOCIDAD*VELOCIDAD
      - 0.008333 AVANCE*AVANCE
      - 0.009167 PROFUNDIDAD*PROFUNDIDAD
      + 0.01500 VELOCIDAD*AVANCE
      + 0.02000 VELOCIDAD*PROFUNDIDAD
      - 0.01000 AVANCE*PROFUNDIDAD

```

## Regresión de superficie de respuesta: VIB TANGENCI vs. VELOCIDAD, AVANCE, PROFUNDIDAD, ...

No se pueden estimar los siguientes términos y se eliminaron:  
 AVANCE\*MATERIAL, PROFUNDIDAD\*MATERIAL, BURIL\*MATERIAL

### Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	17	0.114728	0.006749	*	*
Lineal	6	0.054568	0.009095	*	*
VELOCIDAD	1	0.003156	0.003156	*	*
AVANCE	1	0.000064	0.000064	*	*
PROFUNDIDAD	1	0.000443	0.000443	*	*
BURIL	1	0.002236	0.002236	*	*
MATERIAL	2	0.003902	0.001951	*	*
Cuadrado	3	0.005270	0.001757	*	*
VELOCIDAD*VELOCIDAD	1	0.003041	0.003041	*	*
AVANCE*AVANCE	1	0.000008	0.000008	*	*
PROFUNDIDAD*PROFUNDIDAD	1	0.000072	0.000072	*	*
Interacción de 2 factores	8	0.020625	0.002578	*	*
VELOCIDAD*AVANCE	1	0.006075	0.006075	*	*
VELOCIDAD*PROFUNDIDAD	1	0.000469	0.000469	*	*
VELOCIDAD*BURIL	1	0.000178	0.000178	*	*
VELOCIDAD*MATERIAL	2	0.007385	0.003693	*	*
AVANCE*PROFUNDIDAD	1	0.001084	0.001084	*	*
AVANCE*BURIL	1	0.000971	0.000971	*	*
PROFUNDIDAD*BURIL	1	0.002254	0.002254	*	*
Error	0	*	*		
Total	17	0.114728			

### Resumen del modelo

S	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
*	100.00%	*

Coeficientes codificados

Término	Efecto	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p	VIF
Constante		-0.6167	*	*	*	
VELOCIDAD	2.400	1.200	*	*	*	5476.00
AVANCE	-0.17167	-0.08583	*	*	*	1392.00
PROFUNDIDAD	-0.4533	-0.2267	*	*	*	1392.00
BURIL						
1	0.9667	0.4833	*	*	*	1881.00
MATERIAL						
1	-0.3733	-0.1867	*	*	*	664.00
2	0.3867	0.1933	*	*	*	202.67
VELOCIDAD*VELOCIDAD	-0.4200	-0.2100	*	*	*	2842.00
AVANCE*AVANCE	0.006667	0.003333	*	*	*	272.22
PROFUNDIDAD*PROFUNDIDAD	-0.02000	-0.01000	*	*	*	272.22
VELOCIDAD*AVANCE	-0.18000	-0.09000	*	*	*	138.67
VELOCIDAD*PROFUNDIDAD	-0.05000	-0.02500	*	*	*	138.67
VELOCIDAD*BURIL						
1	0.02667	0.01333	*	*	*	84.00
VELOCIDAD*MATERIAL						
1	0.17000	0.08500	*	*	*	373.33
2	-0.2033	-0.1017	*	*	*	124.44
AVANCE*PROFUNDIDAD	0.2633	0.1317	*	*	*	1664.00
AVANCE*BURIL						
1	-0.17500	-0.08750	*	*	*	662.67
PROFUNDIDAD*BURIL						
1	-0.2667	-0.1333	*	*	*	662.67

Ecuación de regresión en unidades no codificadas

BURIL	MATERIAL	VIB TANGENCIAL PROMEDIO =
1	1	$-2.650 + 2.368 \text{ VELOCIDAD} - 0.2700 \text{ AVANCE}$ $- 0.5333 \text{ PROFUNDIDAD} - 0.2100 \text{ VELOCIDAD*VELOCIDAD}$ $+ 0.003333 \text{ AVANCE*AVANCE}$ $- 0.01000 \text{ PROFUNDIDAD*PROFUNDIDAD}$ $- 0.09000 \text{ VELOCIDAD*AVANCE}$ $- 0.02500 \text{ VELOCIDAD*PROFUNDIDAD}$ $+ 0.1317 \text{ AVANCE*PROFUNDIDAD}$
2	1	$-4.447 + 2.342 \text{ VELOCIDAD} - 0.09500 \text{ AVANCE}$ $- 0.2667 \text{ PROFUNDIDAD} - 0.2100 \text{ VELOCIDAD*VELOCIDAD}$ $+ 0.003333 \text{ AVANCE*AVANCE}$ $- 0.01000 \text{ PROFUNDIDAD*PROFUNDIDAD}$ $- 0.09000 \text{ VELOCIDAD*AVANCE}$ $- 0.02500 \text{ VELOCIDAD*PROFUNDIDAD}$ $+ 0.1317 \text{ AVANCE*PROFUNDIDAD}$
1	2	$-1.897 + 2.182 \text{ VELOCIDAD} - 0.2700 \text{ AVANCE}$ $- 0.5333 \text{ PROFUNDIDAD} - 0.2100 \text{ VELOCIDAD*VELOCIDAD}$ $+ 0.003333 \text{ AVANCE*AVANCE}$ $- 0.01000 \text{ PROFUNDIDAD*PROFUNDIDAD}$ $- 0.09000 \text{ VELOCIDAD*AVANCE}$ $- 0.02500 \text{ VELOCIDAD*PROFUNDIDAD}$ $+ 0.1317 \text{ AVANCE*PROFUNDIDAD}$
2	2	$-3.693 + 2.155 \text{ VELOCIDAD} - 0.09500 \text{ AVANCE}$ $- 0.2667 \text{ PROFUNDIDAD} - 0.2100 \text{ VELOCIDAD*VELOCIDAD}$ $+ 0.003333 \text{ AVANCE*AVANCE}$ $- 0.01000 \text{ PROFUNDIDAD*PROFUNDIDAD}$ $- 0.09000 \text{ VELOCIDAD*AVANCE}$

```

- 0.02500 VELOCIDAD*PROFUNDIDAD
+ 0.1317 AVANCE*PROFUNDIDAD

1      3      VIB TANGENCIAL PROMEDIO = -2.333 + 2.300 VELOCIDAD - 0.2700 AVANCE
- 0.5333 PROFUNDIDAD - 0.2100 VELOCIDAD*VELOCIDAD
+ 0.003333 AVANCE*AVANCE
- 0.01000 PROFUNDIDAD*PROFUNDIDAD
- 0.09000 VELOCIDAD*AVANCE
- 0.02500 VELOCIDAD*PROFUNDIDAD
+ 0.1317 AVANCE*PROFUNDIDAD

2      3      VIB TANGENCIAL PROMEDIO = -4.130 + 2.273 VELOCIDAD - 0.09500 AVANCE
- 0.2667 PROFUNDIDAD - 0.2100 VELOCIDAD*VELOCIDAD
+ 0.003333 AVANCE*AVANCE
- 0.01000 PROFUNDIDAD*PROFUNDIDAD
- 0.09000 VELOCIDAD*AVANCE
- 0.02500 VELOCIDAD*PROFUNDIDAD
+ 0.1317 AVANCE*PROFUNDIDAD

```

## Regresión de superficie de respuesta: RUGOSIDAD PR vs. VELOCIDAD, AVANCE, PROFUNDIDAD, ...

No se pueden estimar los siguientes términos y se eliminaron:  
 AVANCE\*MATERIAL, PROFUNDIDAD\*MATERIAL, BURIL\*MATERIAL

### Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	17	71.0895	4.1817	*	*
Lineal	6	25.9610	4.3268	*	*
VELOCIDAD	1	1.7200	1.7200	*	*
AVANCE	1	0.0416	0.0416	*	*
PROFUNDIDAD	1	2.9997	2.9997	*	*
BURIL	1	1.7776	1.7776	*	*
MATERIAL	2	16.5203	8.2602	*	*
Cuadrado	3	1.9967	0.6656	*	*
VELOCIDAD*VELOCIDAD	1	1.6377	1.6377	*	*
AVANCE*AVANCE	1	0.6313	0.6313	*	*
PROFUNDIDAD*PROFUNDIDAD	1	1.2466	1.2466	*	*
Interacción de 2 factores	8	45.6671	5.7084	*	*
VELOCIDAD*AVANCE	1	13.5221	13.5221	*	*
VELOCIDAD*PROFUNDIDAD	1	2.8633	2.8633	*	*
VELOCIDAD*BURIL	1	1.0914	1.0914	*	*
VELOCIDAD*MATERIAL	2	9.0993	4.5497	*	*
AVANCE*PROFUNDIDAD	1	1.0432	1.0432	*	*
AVANCE*BURIL	1	0.3359	0.3359	*	*
PROFUNDIDAD*BURIL	1	1.7739	1.7739	*	*
Error	0	*	*		
Total	17	71.0895			

### Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
*	100.00%	*	*

Coeficientes codificados

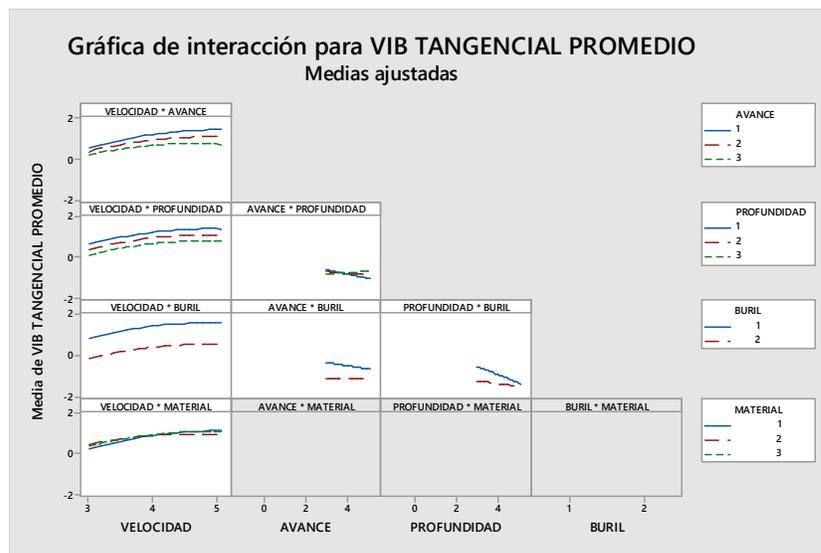
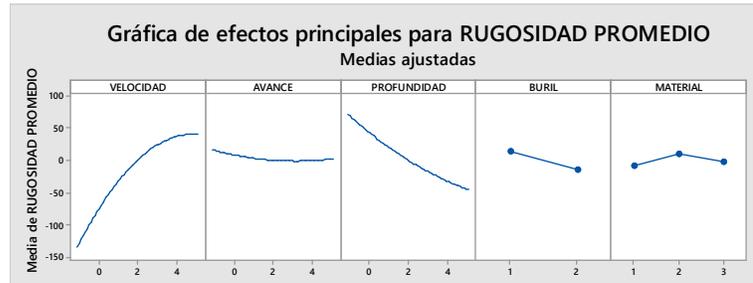
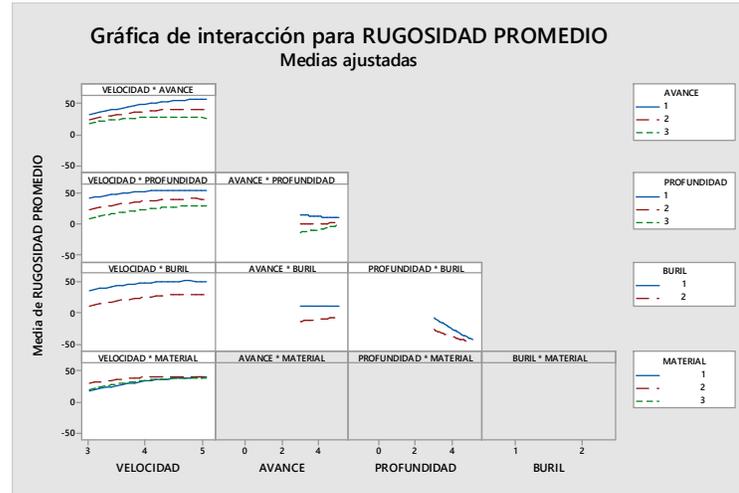
Término	Efecto	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p	VIF
Constante		0.5359	*	*	*	
VELOCIDAD	56.03	28.02	*	*	*	5476.00
AVANCE	-4.392	-2.196	*	*	*	1392.00
PROFUNDIDAD	-37.31	-18.65	*	*	*	1392.00
BURIL						
1	27.26	13.63	*	*	*	1881.00
MATERIAL						
1	-16.331	-8.165	*	*	*	664.00
2	21.85	10.92	*	*	*	202.67
VELOCIDAD*VELOCIDAD	-9.746	-4.873	*	*	*	2842.00
AVANCE*AVANCE	1.8728	0.9364	*	*	*	272.22
PROFUNDIDAD*PROFUNDIDAD	2.632	1.316	*	*	*	272.22
VELOCIDAD*AVANCE	-8.492	-4.246	*	*	*	138.67
VELOCIDAD*PROFUNDIDAD	3.908	1.954	*	*	*	138.67
VELOCIDAD*BURIL						
1	-2.089	-1.045	*	*	*	84.00
VELOCIDAD*MATERIAL						
1	5.590	2.795	*	*	*	373.33
2	-6.992	-3.496	*	*	*	124.44
AVANCE*PROFUNDIDAD	8.171	4.086	*	*	*	1664.00
AVANCE*BURIL						
1	-3.256	-1.628	*	*	*	662.67
PROFUNDIDAD*BURIL						
1	-7.482	-3.741	*	*	*	662.67

Ecuación de regresión en unidades no codificadas

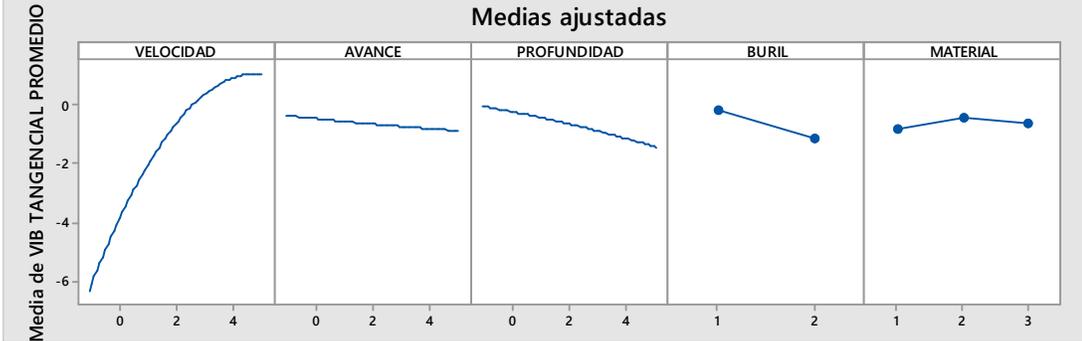
BURIL	MATERIAL	RUGOSIDAD PROMEDIO =
1	1	$-4.405 + 53.84 \text{ VELOCIDAD} - 7.248 \text{ AVANCE}$ $- 39.74 \text{ PROFUNDIDAD} - 4.873 \text{ VELOCIDAD*VELOCIDAD}$ $+ 0.9364 \text{ AVANCE*AVANCE} + 1.316 \text{ PROFUNDIDAD*PROFUNDIDAD}$ $- 4.246 \text{ VELOCIDAD*AVANCE} + 1.954 \text{ VELOCIDAD*PROFUNDIDAD}$ $+ 4.086 \text{ AVANCE*PROFUNDIDAD}$
2	1	$-57.32 + 55.93 \text{ VELOCIDAD} - 3.993 \text{ AVANCE}$ $- 32.26 \text{ PROFUNDIDAD} - 4.873 \text{ VELOCIDAD*VELOCIDAD}$ $+ 0.9364 \text{ AVANCE*AVANCE} + 1.316 \text{ PROFUNDIDAD*PROFUNDIDAD}$ $- 4.246 \text{ VELOCIDAD*AVANCE} + 1.954 \text{ VELOCIDAD*PROFUNDIDAD}$ $+ 4.086 \text{ AVANCE*PROFUNDIDAD}$
1	2	$27.27 + 47.55 \text{ VELOCIDAD} - 7.248 \text{ AVANCE}$ $- 39.74 \text{ PROFUNDIDAD} - 4.873 \text{ VELOCIDAD*VELOCIDAD}$ $+ 0.9364 \text{ AVANCE*AVANCE} + 1.316 \text{ PROFUNDIDAD*PROFUNDIDAD}$ $- 4.246 \text{ VELOCIDAD*AVANCE} + 1.954 \text{ VELOCIDAD*PROFUNDIDAD}$ $+ 4.086 \text{ AVANCE*PROFUNDIDAD}$
2	2	$-25.65 + 49.64 \text{ VELOCIDAD} - 3.993 \text{ AVANCE}$ $- 32.26 \text{ PROFUNDIDAD} - 4.873 \text{ VELOCIDAD*VELOCIDAD}$ $+ 0.9364 \text{ AVANCE*AVANCE} + 1.316 \text{ PROFUNDIDAD*PROFUNDIDAD}$ $- 4.246 \text{ VELOCIDAD*AVANCE} + 1.954 \text{ VELOCIDAD*PROFUNDIDAD}$ $+ 4.086 \text{ AVANCE*PROFUNDIDAD}$
1	3	$5.190 + 51.75 \text{ VELOCIDAD} - 7.248 \text{ AVANCE}$ $- 39.74 \text{ PROFUNDIDAD} - 4.873 \text{ VELOCIDAD*VELOCIDAD}$ $+ 0.9364 \text{ AVANCE*AVANCE} + 1.316 \text{ PROFUNDIDAD*PROFUNDIDAD}$ $- 4.246 \text{ VELOCIDAD*AVANCE} + 1.954 \text{ VELOCIDAD*PROFUNDIDAD}$ $+ 4.086 \text{ AVANCE*PROFUNDIDAD}$

2 3

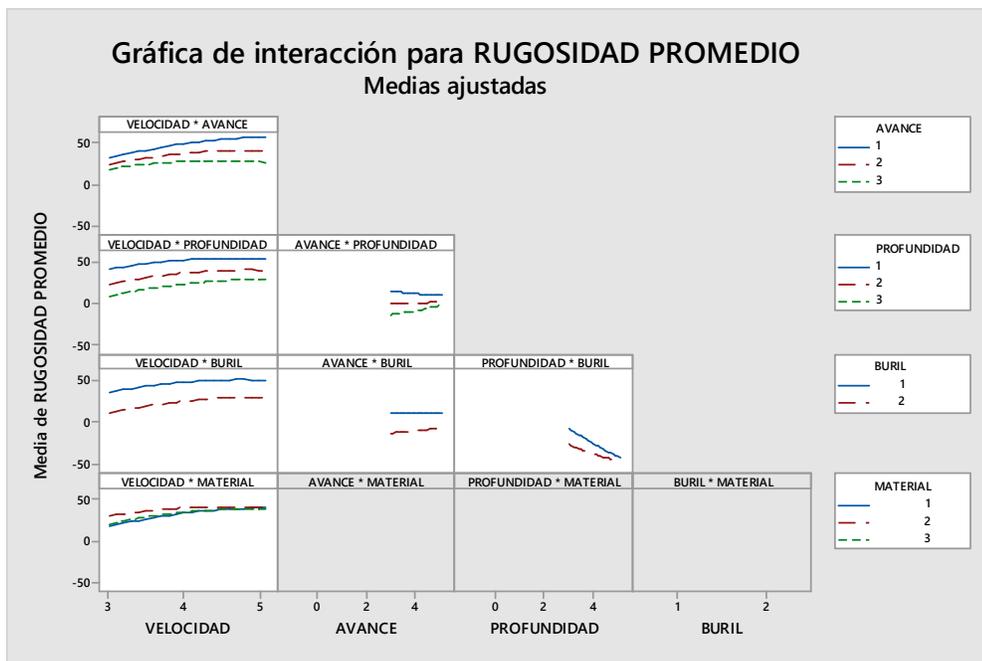
$$\begin{aligned}
 \text{RUGOSIDAD PROMEDIO} = & -47.72 + 53.84 \text{ VELOCIDAD} - 3.993 \text{ AVANCE} \\
 & - 32.26 \text{ PROFUNDIDAD} - 4.873 \text{ VELOCIDAD*VELOCIDAD} \\
 & + 0.9364 \text{ AVANCE*AVANCE} + 1.316 \text{ PROFUNDIDAD*PROFUNDIDAD} \\
 & - 4.246 \text{ VELOCIDAD*AVANCE} + 1.954 \text{ VELOCIDAD*PROFUNDIDAD} \\
 & + 4.086 \text{ AVANCE*PROFUNDIDAD}
 \end{aligned}$$



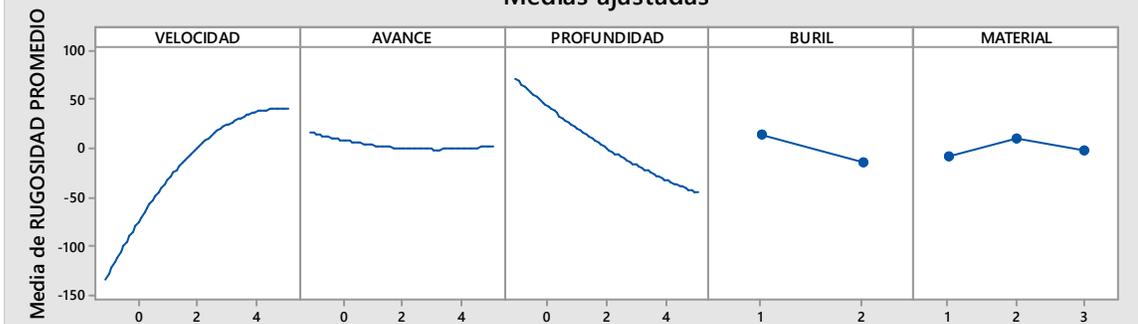
### Gráfica de efectos principales para VIB TANGENCIAL PROMEDIO Medias ajustadas



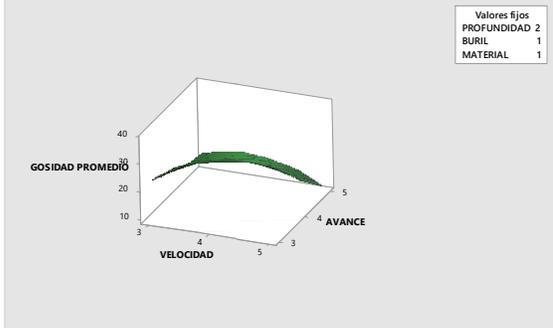
### Gráfica de interacción para RUGOSIDAD PROMEDIO Medias ajustadas



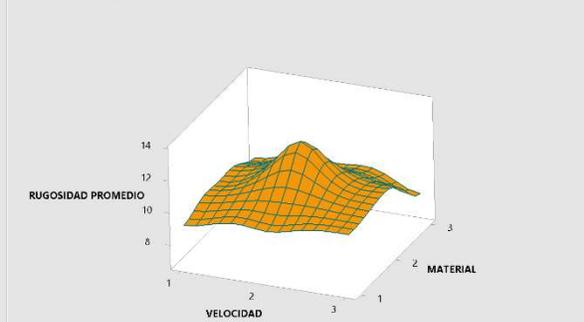
### Gráfica de efectos principales para RUGOSIDAD PROMEDIO Medias ajustadas



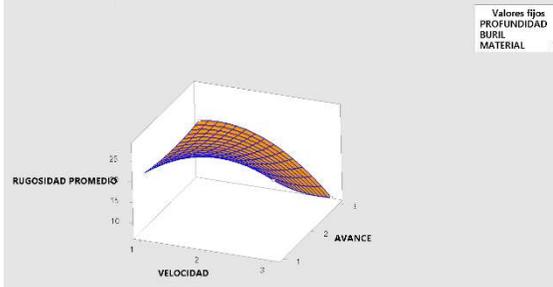
Gráfica de superficie de RUGOSIDAD PROMEDIO vs. AVANCE, VELOCIDAD



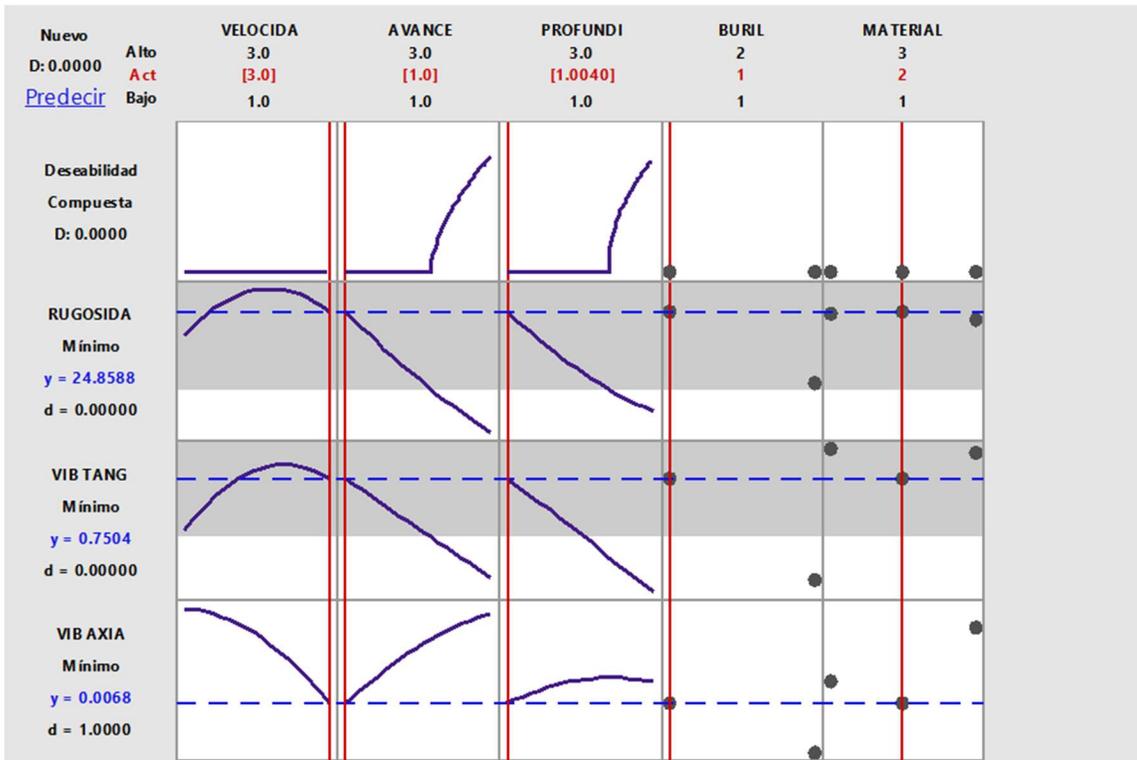
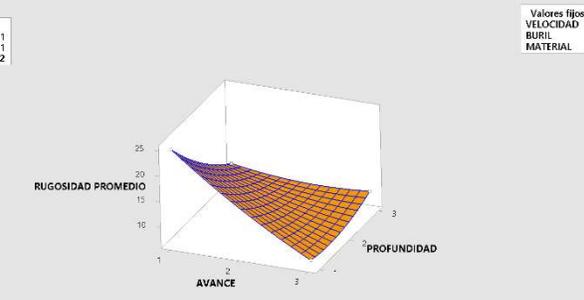
Gráfica de superficie de RUGOSIDAD PROMEDIO vs. MATERIAL, VELOCIDAD



Gráfica de superficie de RUGOSIDAD PROMEDIO vs. AVANCE, VELOCIDAD



Gráfica de superficie de RUGOSIDAD PROMEDIO vs. PROFUNDIDAD, AVANCE



ANEXO 1

