

Modelado de variables mediante la aplicación de un diseño experimental para determinar el valor más cercano al teórico en la longitud de una cortadora láser

Erick Pérez Murillo

Profesor de la carrera de Ingeniería en Producción Industrial
Campus Tecnológico Local San Carlos
Instituto Tecnológico de Costa Rica
✉ eperez@itcr.ac.cr
Teléfono: (506) 2401 3251
ORCID: 0000-0002-5779-0563

Daniela Alfaro Martínez

Estudiante de la carrera de Ingeniería en Producción Industrial
Campus Tecnológico Local San Carlos
Instituto Tecnológico de Costa Rica
✉ dani07@estudiantec.cr

Ericka Ramírez Murillo

Estudiante de la carrera de Ingeniería en Producción Industrial
Campus Tecnológico Local San Carlos
Instituto Tecnológico de Costa Rica
✉ erickadariana@estudiantec.cr

Andy Rodríguez Retana

Estudiante de la carrera de Ingeniería en Producción Industrial
Campus Tecnológico Local San Carlos
Instituto Tecnológico de Costa Rica
✉ arrs2002@estudiantec.cr

Introducción:

Un experimento se entiende como una o varias pruebas en las cuales se inducen cambios deliberados en las variables de entrada de un proceso o sistema, de manera que sea posible observar e identificar las causas de los cambios en la respuesta de salida (Montgomery, 2013).

En nuestro caso vamos a considerar el proceso de corte utilizando una

cortadora láser. Su variable de salida o respuesta es la longitud obtenida y como variables de entrada se consideran la potencia, altura y velocidad.

Al momento de configurar la cortadora a esta se le pide una determinada longitud, sin embargo, es posible obtener valores diferentes a los especificados. De esta manera la diferencia observada entre lo solicitado o valor hipotético y lo obtenido o valor real es lo que se pretende estudiar. Para efectos de este estudio cuanto más cercano a cero sea la diferencia, mejor, ya que, si se logra un valor de cero, se tendría que no existe diferencia entre el valor especificado y el obtenido.

En esta situación, como en cualquier otra donde exista una especificación, es deseable que el valor real sea lo más cercano al especificado. Así lo explica Taguchi, cuando habla de la función de pérdida para la sociedad, en la cual indica que, cuanto más se alejan los valores de la especificación, mayor es la pérdida financiera que se produce para esta. Por esta razón se establece

que, pérdidas de ingresos por ventas bajas se deben a una mala calidad, a ineficiencias de proceso, a una característica de calidad se desvía de su valor meta, aun cuando esté dentro de los límites de especificación (Juran, 1998).

En el experimento entonces se plantea como objetivo el encontrar la combinación de niveles de las variables de entrada que permitan obtener una diferencia entre el valor especificado y el real lo más cercano a cero.

Para este caso particular, se tiene una restricción de tiempo y materiales disponibles, razón por la cual se utiliza un tamaño de muestra relativamente pequeño, aunque como se verá más adelante aun así se considera adecuado.

Por un tema de simplicidad del estudio, en este se van a incorporar únicamente tres factores, los cuales fueron acordados con un experto del proceso, tal y como se recomienda debe hacerse, esto es, el uso de conocimiento experto en materia operativa, que no es necesariamente con criterio estadístico (Montgomery, 2013).

Marco Conceptual

El siguiente diagrama muestra el abordaje propuesto:

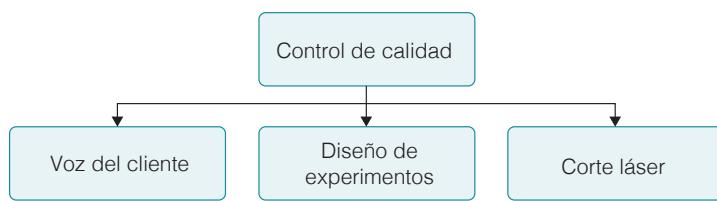


Figura 1. Abordaje del marco conceptual, autoría personal.

Control de Calidad

Las acciones llevadas a cabo en diferentes procesos van orientadas al diseño de productos y servicios que cumplan los requisitos establecidos por los clientes (Acuña, 2003), por ejemplo, el cumplimiento de una especificación o el logro de un valor determinado.

En la mayoría de las organizaciones la función de aseguramiento de calidad se diseña para mejorar continuamente su habilidad de brindar productos y servicios que alcancen o superen los requerimientos de los clientes (Benbow and Broome, 2012).

La calidad se define en términos del uso dado al producto y del nivel de satisfacción logrado (Acuña, 1996). Lo anterior quiere decir que un producto se evalúa como de buena o mala calidad dependiendo de para qué fue intencionado y cuán bien cumple con esa función; en este caso, al indicársele a la máquina una dimensión cuanto más cercano sea el valor obtenido a ese valor indicado, mejor.

Voz del cliente

La razón última de ser de una empresa es el cliente y atender sus necesidades (Gutiérrez, 2014). Es por ello que, buscar su satisfacción debería ser parte prioritaria de cualquier gestión. Una parte importante de esto es entender las necesidades y traducirlas de manera efectiva en requerimientos específicos.

Se debe atender la “voz del cliente” y emplear procesos sistemáticos para escucharlos y aprender de ellos (Evans, 2008). En este caso, el grupo que conduce el experimento considera (esa es su “voz”) que esa diferencia entre lo solicitado y lo obtenido debe ser idealmente cero y por ello quiere saber qué factores influyen en ella.

Diseño de experimentos

El diseño de experimentos es una prueba o serie de pruebas (Montgomery, 2018); en ellas, se

inducen cambios en las variables de entrada o predictoras con la intención de observar su resultado en la respuesta.

El diseño 2^k es una herramienta poderosa, es sencilla y práctica (Walpole, 2012) por lo que se selecciona para este experimento.

Veamos algunas nociones que deben tomarse en cuenta:

- El modelo estadístico: este describe, como su nombre lo dice, el modelo matemático que explica lo que se va a estudiar. Lo que se va a estudiar se conoce como salida o respuesta y se ve afectada por lo que se denomina variables de entrada, que son los factores que inciden en esta.
- El objetivo del experimento: por lo general se tienen tres tipos de objetivos, maximizar, minimizar u obtener una meta. En este caso en particular, el equipo deseaba obtener una meta de cero en la diferencia.
- Variable de respuesta: o variable de interés o salida, es la variable que se ve afectada y por ende se quiere estudiar.
- Factores y niveles: los factores son las variables que afectan presuntamente a la variable de respuesta y los niveles son puntos en los cuales se medirá o se establecerán los factores y en los cuales se harán combinaciones entre los factores.
- Las hipótesis a probar: se han de plantear tantas hipótesis como términos se tengan, ya sea por factores principales o por interacciones entre ellos.
- Análisis de supuestos: se analiza por medio de los residuos, los cuales deben ser normalmente distribuidos, con varianzas iguales e independientes.
- Errores: se establecen dos tipos de errores, el tipo I o a, definido como la probabilidad de rechazar H_0 cuando es verdadera (o sea, rechazar algo bueno). Y el error tipo II o b, definido como la probabilidad de no rechazar H_0 cuando esta es falsa (o sea, aceptar algo malo).

Los experimentos tienen dos grandes fases, una es propiamente el diseño y después de ejecutarse viene el análisis.

- Diseño del experimento: se define el objetivo, la variable de respuesta, los factores y niveles y el diseño a utilizar.
- Análisis del experimento: se recolectan los datos y se grafican, se procede con el análisis formal y se establecen las conclusiones y recomendaciones pertinentes.

Corte láser

El corte láser es principalmente un proceso térmico en el cual un rayo láser es enfocado para fundir material en un área definida. Se utiliza un hilo de gas coaxial para impulsar el material fundido y crear un corte. Se produce un corte continuo al mover el rayo láser o la pieza de trabajo bajo control CNC (TWI-global.com, 2025).

En este experimento a la cortadora se le especifica cierta dimensión para el corte de las piezas, pero se sabe que, el corte del láser hará que la dimensión obtenida en realidad no sea la misma que se define.

Es por ello que se pretende estudiar cuál combinación de factores permite acercar el valor real al especificado en la máquina.

Metodología

Para el desarrollo de este estudio se siguió la metodología recomendada por Montgomery (2013), la cual se describe a continuación:

Establecimiento del problema

Como se indicó anteriormente, en este caso se pretende estudiar la relación entre los factores a estudiar y la diferencia observada entre el valor especificado o esperado y el real.

Selección de una variable de respuesta

Para el experimento se seleccionó la longitud obtenida como variable de respuesta, medida en milímetros.

Factor	Nivel bajo (-1)	Nivel alto (1)	Unidad de medida
Potencia (A)	75	95	Miliamperios (mA)
Altura (B)	5	7,5	Milímetros (mm)
Velocidad (C)	15	20	Milímetros por segundo (mm/s)

Cuadro 1. Definición de factores y niveles para el experimento.

Selección del diseño experimental

Se utiliza el diseño factorial de dos niveles, de manera genérica conocida como 2^k y en este caso en particular el 2^3 , donde la base denota el número de niveles y el exponente los factores en estudio. Este modelo es uno ampliamente utilizado. Dada la selección y dado que se tienen tres factores el modelo estadístico a trabajar originalmente es:

$$Y_{ijkl} = \mu + \tau_i + \beta_j + \chi_k + \alpha\beta_{ij} + \alpha\chi_{ik} + \beta\chi_{jk} + \alpha\beta\chi_{ijk} + \varepsilon_{ijkl}$$

Este modelo puede interpretarse de manera sencilla como la respuesta, en este caso la longitud es una

Selección de los factores y sus niveles

Los factores por estudiar se detallan a continuación:

H_1 : El término es significativo para la variable de respuesta.

La hipótesis nula es la que se representa como H_0 , mientras que la hipótesis alternativa se representa como H_1 .

Ejecución del experimento

Este se desarrolla de manera aleatorizada, es decir, el orden de las corridas fue al azar, para lograr que los errores sean distribuidos de manera independiente (Montgomery, 2013).

Análisis estadístico de los datos

Se utiliza el software estadístico Minitab ® a fin de agilizar la obtención de resultados y proceder de esta manera con su interpretación.

Conclusiones y recomendaciones

Derivado del análisis se plantearán conclusiones y recomendaciones del estudio.

Análisis de resultados

Recolección de la información

Tal y como se mencionó en la sección anterior, los datos fueron recolectados de manera aleatoria.

Análisis gráfico

El análisis gráfico es de gran ayuda en muchos experimentos y análisis de datos en general, pues permite visualizar el comportamiento de estos de manera más sencilla, algo que a veces en términos de indicadores o valores puntuales resultaría un tanto complejo. Si bien en muchas situaciones no es posible llegar a conclusiones definitivas, sí es posible como se indicó, al menos, darse una idea del comportamiento del fenómeno en estudio.

Comencemos por ver un gráfico de caja y bigotes que relacione nuestras variables con la respuesta. En el eje Y del gráfico está la respuesta y las variables se pueden apreciar en el eje X.

función de m o media global, más el efecto que sobre esta puedan tener los factores principales, las interacciones dobles y triple entre estos factores y el error experimental presente en todo experimento.

Este modelo puede reducirse si eventualmente algún término resulta no ser significativo.

De la misma manera deben plantearse hipótesis para cada término en estudio, es decir, para los factores principales y para sus interacciones. De manera general, las hipótesis planteadas fueron:

H_0 : El término no es significativo para la variable de respuesta.

En el gráfico se observa que cuando se trabaja con diferentes valores de velocidad, en esencia se obtienen los mismos valores respuesta. Nótese que, con respecto al eje

más interno, el de velocidad, las cajas por lo general están una al lado de la otra. Un poco más difícil de discernir es el tema de la potencia, pero nuevamente, el

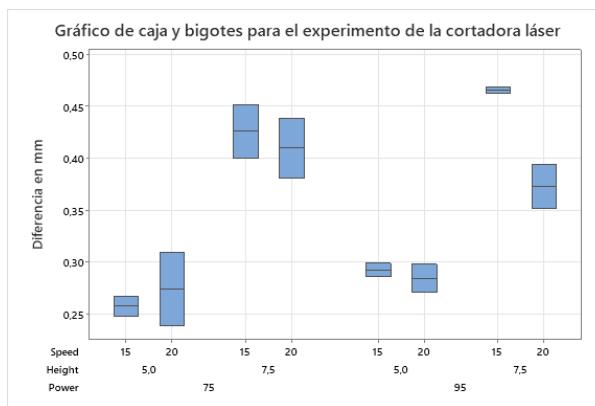


Gráfico 1. Relación de las variables de entrada con la respuesta.

comportamiento tanto en su valor bajo como alto es muy parecido. Sin embargo, cuando se analiza la salida en relación con la altura se puede observar cómo el resultado

es diferente cuando se trabaja en 50 mm que cuando se opera con 75 mm. Este comportamiento se aprecia de manera más clara cuando se analizan gráficos individuales.

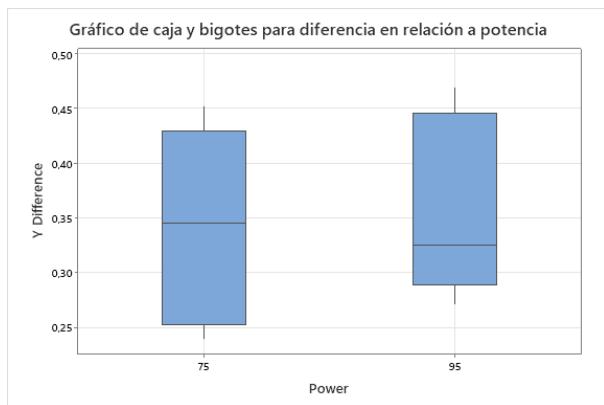


Gráfico 2. Relación de la Potencia con la respuesta.

Como se puede apreciar, no hay diferencia entre los diferentes valores de potencia y la salida o esta es muy poca.

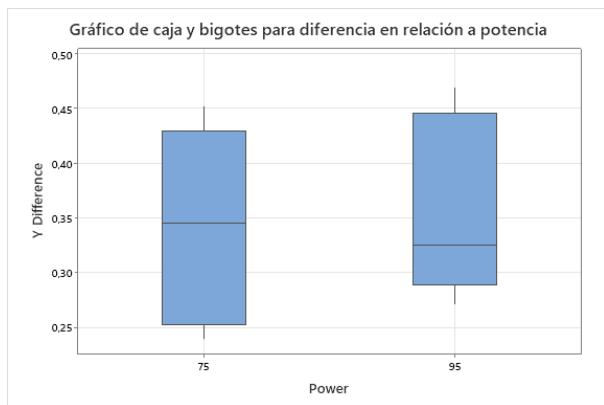


Gráfico 3. Relación de la Velocidad con la respuesta.

Similar al gráfico anterior, no parece haber diferencia entre los diferentes valores de velocidad y la salida o esta es muy poca.

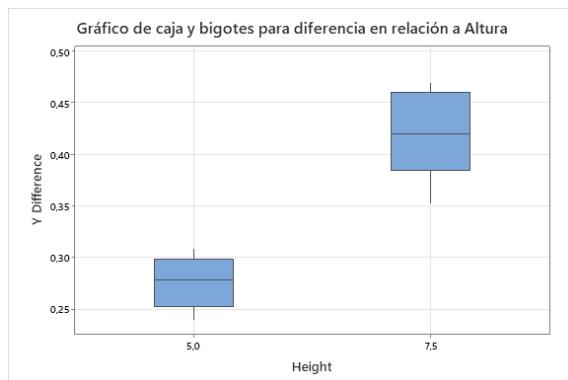


Gráfico 4. Relación de la Altura con la respuesta.

A diferencia de las variables anteriores, aquí pareciera haber diferencia entre los diferentes valores de altura y la salida. Nótese que, cuando la altura se establece en 5 mm, la diferencia entre el valor especificado y el obtenido tiende a ser menor que cuando esta se fija en 7,5 mm.

Análisis matemático

Si bien al análisis gráfico nos ha dado una luz sobre el comportamiento de los datos, es importante realizar una evaluación formal sobre los resultados obtenidos. Para ello se utilizó el software estadístico de Minitab®, del cual se obtuvo que, solo la variable Altura resulta significativa en la respuesta estudiada.

Un aspecto importante a considerar es el comportamiento de los residuos, pues son los que le dan validez al modelo. El análisis realizado indica que, se cumplen los supuestos y por ende el modelo es válido.

Otro aspecto importante por considerar es la idoneidad del modelo, la cual se puede evaluar mediante el R^2 o coeficiente de determinación, el cual en términos simples indica que porcentaje de la variación observada es explicada por el modelo seleccionado. En este caso se tiene un 82%; este valor se considera aceptable cuando supera el 70% (Gutiérrez, 2008).

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,0351470	82,27%	81,00%	76,84%

Al establecerse que solo la variable altura tiene un efecto significativo sobre la variable de respuesta, es posible concluir que a menor altura menor será la diferencia observada con respecto al valor establecido como referencia. Esto lo podemos ver claramente en el gráfico de caja y bigotes o también mediante una aplicación del software que permite buscar la mejor respuesta para un determinado objetivo, el cual nos indica que cuando la altura es de 5 mm, la diferencia esperada es de 0,28 mm.

Finalmente, la potencia de esta prueba se ha establecido en 96%, que es la probabilidad de rechazar la hipótesis nula cuando esta es falsa, algo deseable, o que se tiene una probabilidad de un 4% de cometer un error tipo II.

Conclusiones

En cualquier experimento, el uso de criterio experto y conocimiento no estadístico resulta fundamental para el éxito de este. El recurrir a expertos permite, entre otras cosas, una adecuada definición de la región experimental, ya que, conociendo la región operacional, se puede plantear un experimento dentro de los límites aceptables de operación del proceso y evitar así menoscabo en los equipos. Además, este conocimiento experto del proceso permitió en este caso la adecuada definición de factores y sus niveles.

El diseño experimental ha demostrado ser una herramienta eficiente para la determinación de la combinación de factores que permitan el logro de objetivos definidos. Si bien estos resultados podrían obtenerse de la misma manera con historia, esto es, dejando correr los procesos por prolongados períodos de tiempo, el uso del diseño de experimental permite reducir la incertidumbre con respecto a los resultados en un menor tiempo.

Aunque, como se mencionó, el diseño experimental resulta ser una herramienta útil, es necesario el

realizar pruebas confirmatorias de los resultados obtenidos, pues no se debe olvidar que hubo variables que no se incluyeron en el experimento o se mantuvieron fijas, por lo que poner a prueba en condiciones normales de operación permite ratificar los resultados obtenidos.

Para este caso en particular, solo uno de los factores resultó significativo, la altura, la cual indica que a 5 mm. es donde se tiene menor error entre el valor definido y el obtenido.

Un solo experimento no permite tener una respuesta definitiva a la pregunta de investigación u objetivo planteado. Por lo general se requieren hacer otros experimentos a partir de los resultados de los anteriores para buscar la mejor respuesta. Entre 10 mm y 5 mm, resultó ser el mejor punto de corte, pero cualquier persona podría preguntarse si reduciendo esa distancia, digamos a 3 mm, mejoraría el resultado. ¿Cómo saberlo? bueno, habría que plantear otro experimento.

Es recomendable extender este tipo de experimentos a otros equipos o procesos del laboratorio, con la intención de crear conocimiento sobre su funcionamiento y con ello mejorar el uso de recursos y resultados cuando se trabaje con ellos.

Referencias

Acuña, Jorge (1996). Control de calidad: un enfoque integral y estadístico. 2a edición: Editorial Tecnológica de Costa Rica.

Acuña, Jorge (2003). Ingeniería de Confiabilidad. Editorial Tecnológica de Costa Rica.

Benbow, Donald and Broome, Hugh (2012). The certified Reliability Engineer Handbook. ASQ Press.

Evans, James (2008). Administración y control de la Calidad. CENGAGE Learning.

Gutiérrez, Humberto y De la Vara, Román (2008). Análisis y Diseño de experimentos. Mc Graw Hill.

Gutiérrez, Humberto (2014). Calidad y Productividad. Mc Graw Hill.

Gutiérrez, Humberto y De la Vara, Román (2013). Control estadístico de la calidad y seis sigma. Mc Graw Hill.

Juran, Joseph (1998). Juran's quality handbook. Mc Graw Hill.

Montgomery, Douglas (2018).

Applied Statistics and Probability for Engineers. Wiley.

Montgomery, Douglas C (2013).

Design and analysis of experiments. John Wiley & Sons, Inc.

Walpole, Ronald (2012). Probabilidad y estadística para ingeniería y Ciencias. Pearson.

TWI-global.com (5 de junio de 2025).

<https://www.twi-global.com/what-we-do/research-and-technology/technologies/welding-joining-and-cutting/lasers/laser-cutting>

Descansar despierto mejora el aprendizaje

Investigadores descubrieron que hacer pausas entre tareas permite al cerebro consolidar habilidades recién adquiridas, gracias a la repetición de recuerdos en la corteza sensoriomotora.

[https://www.cell.com/cell-reports/fulltext/S2211-1247\(21\)00539-8](https://www.cell.com/cell-reports/fulltext/S2211-1247(21)00539-8)

