

# Application of the DMAIC Methodology to Improve Processes in a Company in the Metalworking Sector

Lucy G. Aragón Casas, M.S.<sup>1</sup>, Manuel R. León Castillo, B.S.<sup>1</sup>, Katherine M. Valdivia Alvarez, B.S.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Pontificia Universidad Católica del Perú, Perú, laragonc@pucp.pe, manuel.leonc@pucp.pe, katherine.valdivia@pucp.pe

*Abstract– DMAIC is a methodology for process improvement applied Six Sigma projects, which represents the continuous improvement of processes and products with the application of statistical and qualitative tools. The main objective is to eliminate the variability in processes and achieve a level of less than 3 or 4 defects per million defect, as a negative for the success and permanence of companies factor. The DMAIC methodology uses 5 phases of a working structure based on the Deming Cycle.*

*This study is conducted in an organization specialized in the metalworking sector Engineering Holding. Initially, the product of greater economic impact is determined. Later, critical customer requirements (CCR), applying Kano model is identified. Next, the process variables that directly influence the CCR, using FMEA are determined. Then, data collection and analysis is performed to verify the stability of processes using control charts; then calculate the capacity and sigma level. Finally, an analysis of the production process the product chosen to determine the dependent variable and the factors for a Design of Experiments (DOE) and generate solutions of ideas is performed.*

*Keywords— Six Sigma, DMAIC, Process Improvement, Engineering Holding I.*

**Digital Object Identifier (DOI):** <http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2015.1.1.214>

**ISBN:** 13 978-0-9822896-8-6

**ISSN:** 2414-6668

**13<sup>th</sup> LACCEI Annual International Conference:** “Engineering Education Facing the Grand Challenges, What Are We Doing?”  
July 29-31, 2015, Santo Domingo, Dominican Republic

**ISBN:** 13 978-0-9822896-8-6

**ISSN:** 2414-6668

**DOI:** <http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2015.1.1.214>

# Aplicación de la metodología DMAIC para la mejora de procesos en una empresa del sector metalmecánico

Lucy G. Aragón Casas, M.S.<sup>1</sup>, Manuel R. León Castillo, B.S.<sup>2</sup>, Katherine M. Valdivia Alvarez, B.S.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Pontificia Universidad Católica del Perú, Perú, laragonc@pucp.pe, katherine.valdivia@pucp.pe,

<sup>2</sup>Pontificia Universidad Católica del Perú, Perú, manuel.leonc@pucp.pe

**Resumen—** DMAIC es una metodología para la mejora de procesos aplicada en los proyectos de Six Sigma, el cual representa la mejora continua de procesos y productos con la aplicación de herramientas estadísticas y cualitativas. El principal objetivo es eliminar la variabilidad en los procesos y alcanzar un nivel de defectos menor a 3 o 4 defectos por millón, por ser un factor negativo para el éxito y permanencia de las empresas. La metodología DMAIC emplea 5 fases de una estructura de trabajo basada en el Ciclo de Deming.

El presente estudio es realizado en una organización del sector metalmecánico especializada en la Ingeniería de Sujeción. Inicialmente, se determina el producto de mayor impacto económico. Posteriormente, se identifica el requerimiento crítico del cliente (CCR), aplicando el Modelo de Kano. Seguidamente, se determinan las variables de los procesos que influyen directamente en el CCR, mediante el uso de AMFE. Luego, se realiza una recolección y análisis de data para verificar la estabilidad de procesos mediante gráficos de control; para después calcular la capacidad y nivel sigma. Finalmente, se realiza un análisis al proceso de producción del producto elegido para determinar la variable dependiente y los factores para realizar un Diseño de Experimentos (DOE) y generar soluciones de ideas.

**Keywords—** Six Sigma, DMAIC, Mejora de Proceso, Ingeniería de Sujeción

## I. INTRODUCCIÓN

### A. Antecedentes de Estudio

La organización en estudio tiene más de 18 años dedicados a la producción y distribución de productos metálicos de uso estructural enfocada en la ingeniería de sujeción, es decir en uniones empernadas tales como: pernos, tuercas, arandelas, entre otros productos. Estos productos son usados para las diversas industrias como mineras, construcción, automotriz, petroquímica, cementeras, pesquera, textil, alimentos y bebidas. Estos clientes pueden ser nacionales como sudamericanos. En el 2012, los productos metalmecánicos de uso estructural tuvieron un incremento de 16% en el índice de volumen físico (IVF) contribuyendo 4.5 % al índice de crecimiento industrial (ICI) llegando a ser el mayor de todas las actividades de producción en el país [1].

### B. Descripción del Problema para la Organización

La organización tiene un 20% de piezas defectuosas comparado con las piezas ingresadas desde el corte, primera actividad el proceso productivo, en todos sus productos. Presenta un promedio de 71% y 53% en pedidos no atendidos a tiempo en el 2012 y 2013, respectivamente; ya sea por los retrasos en su tiempo de entrega o la mala gestión de los

inventarios. Los pedidos con piezas insatisfechas y no entregados a tiempo han generado insatisfacción en los clientes. Por este motivo, la organización se ha propuesto, dentro de los objetivos del presente año, enfocarse en la satisfacción del cliente y el aumento de la eficiencia productiva de la planta para poder reducir el tiempo de producción, tiempo de entrega y el costo de producción.

### C. Descripción del Producto en Estudio

El enfoque del presente estudio serán los pernos, los cuales son piezas compuestas por un vástago roscado en parte de su longitud, para recibir una tuerca, y una cabeza normalmente de forma hexagonal. Estas son, generalmente, más económicas comparadas con las uniones soldadas en campo.

El perno estructural ASTM A325, es elaborado a partir de una barra de acero circular Acero SAE 1045 de hasta 2 pulgadas de diámetro y 6 metros de largo. El Acero SAE 1045 puede ser Comercial o Certificado.

El Acero SAR 1045 recorre las siguientes operaciones hasta convertirse en el perno estructural ASTM A325: corte, forjado, desbarbado, cilindrado, roscado, revenido y acabado superficial. Adicionalmente, se realiza la verificación de la materia prima, ensayo de dureza y ensayo de torque. La Fig. 1 muestra el flujograma del proceso productivo.

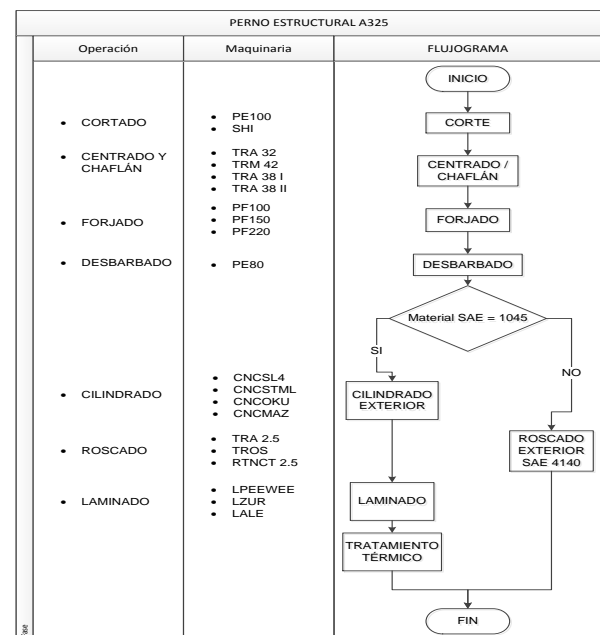


Fig. 1 Flujograma Perno Estructural ASTM A325.

## II. REVISIÓN DE LA LITERATURA

El Six Sigma reconoce la relación entre el número de productos o procesos defectuosos, los costos de la mala calidad y el nivel de satisfacción del cliente. Estadísticamente, mide la capacidad del proceso para lograr una producción con ningún error, basado en la distribución normal. El valor de Six Sigma sirve como parámetro de comparación común entre compañías iguales o diferentes inclusive entre los mismos departamentos de una empresa, tan diferentes como compras, cuentas por cobrar, mantenimiento, ingeniería, producción, recursos humanos, etc. [2].

Esta metodología plantea cinco fases para su diseño, los cuales permiten el éxito en la mejora de los procesos: Definir, Medir, Analizar, Mejorar y Controlar. Los que constituye el DMAIC una metodología aplicada con éxito en empresas como Motorola, Allied Signal, ABB, General-Electric, entre otras. Es una estructura de trabajo la cual permite manejar el mismo lenguaje en todos los niveles de la empresa. Asegura el no apresuramiento, previniendo la omisión de pasos críticos [3].

En la fase Definir, se trata de conocer cada proceso, actividades y personal que laboran en la misma directa o indirectamente. Se propone un líder de grupo que por lo general un Cinta Negra o Maestro Cinta Negra el cual se reunirá con el Campeón para la selección del equipo multifuncional que será responsable de las actividades de la metodología Six Sigma [4].

En la fase de Medir, se seleccionan una o más características críticas, analiza el proceso, toma las medidas necesarias, se registran los resultados, evalúa los sistemas de medición, y se estima la capacidad del proceso a corto plazo [2].

En la fase Analizar, se hace un análisis para explorar y dar un diagnóstico del problema a partir de la información obtenida en la fase de medición. En ella se identifica los factores que permiten lograr una mejora sustancial y lograr un mejor desempeño del proceso. En algunos casos es necesario rediseñar el proceso o producto [2].

En la fase Mejorar, se desarrolla en la práctica todas las estrategias de mejora. Se definen que factores se van a controlar para medir el efecto sobre las características críticas y se planifica la mejor forma de llevar a cabo la mejora, con el fin de buscar el desempeño óptimo del proceso [2].

En la fase Controlar, En esta fase se documenta el resultado de la mejora, y se diseña herramientas para monitorear el proceso, una vez se haya validado que se han logrado los objetivos de mejora [2].

## III. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DMAIC

La organización cuenta con diversas familias de productos por lo que nuestro objeto de estudio se enfocará en la que genera mayor porcentaje de ventas.

En la Tabla I, la primera columna enlista las siete familias de productos. En la segunda columna se muestran las ventas valorizadas en soles (S/.) para cada familia en el periodo de enero a agosto de 2014. En la tercera columna, se calculó el

porcentaje que representan las ventas de cada familia sobre las ventas totales. En la última columna, se muestra el acumulado de los porcentajes.

TABLA I  
Valorizado de Ventas por Familia de Productos

Familia	Valorizado	Porcentaje	Acumulado
Perno Hexagonal	S/. 87,636.71	19%	19%
Perno Estructural	S/. 85,070.55	19%	38%
Tuerca Hexagonal	S/. 76,185.78	17%	55%
Tuerca estructural	S/. 69,393.62	15%	70%
Anclaje Recto	S/. 56,023.25	12%	82%
Conector de corte	S/. 53,043.62	12%	94%
Perno Molino	S/. 28,319.20	6%	100%
<b>TOTAL</b>	S/. 455,672.73		

A partir de la Tabla I., se realizó un Diagrama de Pareto presentado en la Fig. 2, donde se observa que las familias de perno hexagonal y estructural ocupa un 76% del valorizado, por lo tanto representan el mayor volumen de ventas del periodo.

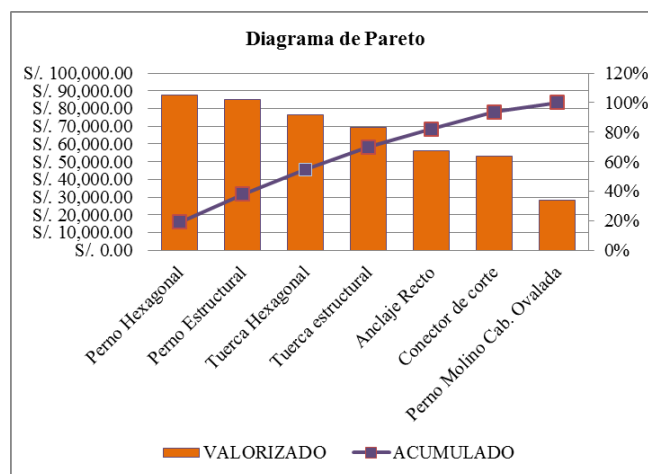


Fig. 2 Diagrama de Pareto del Valorizado de Ventas Realizadas.

Durante el 2014, se realizó la producción de 4 tipos de pernos estructurales: ASTM A325, ASTM A490, ASTM A307 y DIN 6914. Siendo el Perno ASTM A325 el que representa un 37.12% del total de ventas, valorizadas en soles, de la familia de pernos estructurales. Por lo que, se eligió el perno estructural ASTM A325 para el presente estudio.

### A. Fase de Definición

En esta primera fase, mediante el diagrama SIPOC se identificó que proveedores externos suministran la barra de Acero SAE 1045, insumos y servicios de tratamiento térmico; el área de almacén brinda la matriz que será usada para en el

proceso de forjado; y el área de ingeniería y desarrollo brinda las especificaciones. El resultado del proceso es el lote de pernos estructurales junto con el dossier de calidad, el cual está conformado por lo certificados de calidad de materia prima, producción y de tratamientos térmicos. A través de Mapas de Procesos se identificó los parámetros del proceso y las características del producto para cada una de las operaciones del proceso de producción.

Mediante el Modelo de Kano se identificó el requerimiento crítico del cliente (CCR). Gitlow [5] propone desarrollar tres etapas para determinar la voz del cliente. En la primera etapa, se realizó reuniones con la gerencia general, área de ingeniería y desarrollo, área de producción y control de calidad con el fin de identificar las características críticas del objeto de estudio. En la segunda etapa, se realizó reuniones con los clientes sobre las características que influyen en su satisfacción. Finalmente en la tercera etapa, se reforzó la Voz del Cliente (VoC), en función de las dos primeras etapas, mediante una encuesta de preguntas funcionales y disfuncionales con un número de muestra de 75 clientes con un N.C. de 95% error de precisión de 10% y proporción esperada de 50%. La lista de requerimientos se presenta en la Tabla II.

TABLA II  
Lista de Requerimientos Planteados en la Encuesta

Número	Requerimiento
R1	Cumplimiento en la entrega a tiempo
R2	El producto cumple con las especificaciones
R3	Atención Buena
R4	Calidad del producto
R5	Empaque
R6	Marcado
R7	Precio
R8	Asesoría en la compra
R9	Entrega acorde a la cantidad solicitada

Posteriormente, se realizó el análisis de las respuestas de los clientes a los requerimientos planteados en la encuesta mediante la Tabla III. Esta tabla muestra los requerimientos que agregan valor al cliente. Se logró identificar que los clientes tienen alta satisfacción si es que los productos cuentan con los requerimientos 1(76%) y 8 (72%). Por otro lado, los clientes están satisfechos si es que el producto cuenta con los requerimientos 5(53.33%), 6 (52%), 7 (41.33%), 9 (53.33%), 3 (46.67%). Por último, el cliente estará insatisfecho si es que el producto no cuenta con los requerimientos 4 (89.33%) y 2 (74.67%).

La ecuación (1) muestra las fórmulas que fueron aplicadas para el cálculo de los coeficientes C1 y C2 mostrados en la Tabla IV, la cual contiene los resultados consolidados para los requerimientos. Los coeficientes C1 y C2 ayudaran a definir los requerimientos atractivos u obligatorios.

$$Mejor = \frac{MS + S}{MS + S + I} \quad Peor = \frac{I}{MS + S + I} \quad (1)$$

TABLA III  
Análisis de Respuesta de los Clientes

Requerimientos		Requerimientos Disfuncionales			
		1 (Le gusta)	2 (Es lo Normal)	3 (No me interesa)	4 (No quisiera)
Requerimientos Funcionales	1 (Le gusta)	-	Muy Satisfecho	Muy Satisfecho	Satisfecho
	2 (Es lo Normal)	-	-	-	Insatisfecho
	3 (No me interesa)	-	-	-	Insatisfecho
	4 (No quisiera)	-	-	-	-
Resultado		Nivel de Satisfacción o Insatisfacción (%)			

TABLA IV  
Resultados Consolidados para los Requerimientos

Requerimientos	MS	S	I	Imp.	Mejor	Peor	C1	C2
R1	57	11	7	1	0.91	0.09	0.91	-0.09
R2	5	14	56	1	0.25	0.75	0.25	-0.75
R3	17	35	23	1	0.69	0.31	0.69	-0.31
R4	0	8	67	1	0.11	0.89	0.11	-0.89
R5	8	40	27	1	0.64	0.36	0.64	-0.36
R6	11	39	25	1	0.67	0.33	0.67	-0.33
R7	16	31	16	1	0.63	0.37	0.63	-0.37
R8	54	9	12	1	0.84	0.16	0.84	-0.16
R9	12	40	23	1	0.69	0.31	0.69	-0.31

En la Fig. 3 se aprecian los Valores de C1 y C2 obtenidos por las encuestas a los clientes. En el segundo cuadrante (atractivos) se observa la concentración de 7 requerimientos y dos requerimientos en el cuarto cuadrante (obligatorios). Se concluye que los CCR son R1 y R2. Para el presente estudio nos enfocaremos en el CCR R2.

### B. Fase de Medición

En esta fase, se determinó las Variables del Proceso de producción que influyen en el cumplimiento del CCR R2. Luego, se realizó el estudio al sistema de medición de las variables. Posterior, se evaluó la estabilidad de las operaciones del proceso productivo mediante Gráficos de Control.

Finalmente, se determinó la capacidad y nivel sigma del proceso productivo.

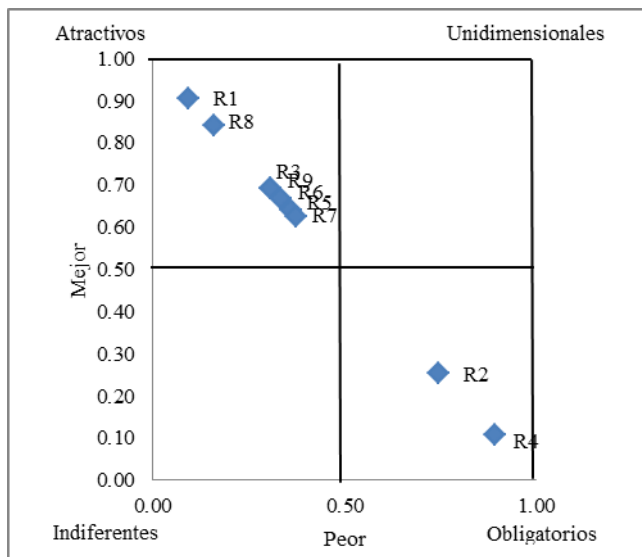


Fig. 3 Clasificación de los Requerimientos del Cliente.

Se desarrolló un Análisis Modal de Fallas y Efectos con la aplicación de la matriz AMFE para identificar los modos de fallos, efectos y causas. Para el CCR R2, de las causas que fueron identificadas, las que obtuvieron un RPN de 336, el valor mayor, fueron las siguientes:

1) *Primera causa:* Ausencia de control en el cálculo y programación de maquinaria para la Longitud de Corte. El exceso en el corte genera reprocesos y una longitud menor genera pérdida de materia prima.

2) *Segunda causa:* Ausencia de control en el proceso de forjado. Posterior al proceso de forjado, se presentan variaciones en las medidas de la cabeza del perno.

En base a las causas identificadas en el Análisis Modal de Fallas y Efectos se identificó las variables del proceso de producción que definen el nivel de desempeño actual, las cuales se encuentran en la Tabla V.

TABLA V  
Variables del Proceso de Producción

Proceso	Variables del proceso
Corte	Longitud de corte
Forjado	Distancia entre caras
Forjado	Altura de cabeza
Forjado	Longitud total
Roscado/Cilindrado	Diámetro medio
Roscado/ Laminado	Diámetro exterior
Roscado	Longitud de rosca
Calidad	Dureza HB

Para determinar las variables del proceso que tienen mayor grado de importancia se aplicó la Técnica de Grupo Nominal (TGN). Para llevar a cabo la TGN, se realizaron preguntas a seis personas del área de Ingeniería y Desarrollo con el fin de que asignen un valor de acuerdo a su importancia. La suma de

la valorización de cada operario es la que determinará el grado de importancia de cada variable. Los resultados se muestran en la Tabla VI.

TABLA VI  
Evaluación TGN de Variables

Variables/Personal	1	2	3	4	5	6	Total
Dureza HB	5	4	4	5	3	5	26
Diámetro medio	6	8	8	7	6	8	43
Diámetro exterior	3	5	3	4	5	4	24
Distancia entre caras	1	1	2	1	1	1	7
Altura de cabeza	7	7	6	8	8	7	43
Longitud de corte	8	6	7	6	7	6	40
Longitud total	2	2	1	2	2	2	11
Longitud de rosca	4	3	4	3	4	3	21

Las principales variables son: El Diámetro Medio, la Altura de Cabeza y la Longitud de Corte, los cuales involucran los procesos de Corte, Forjado y Laminado.

Se realizó un estudio Gage R&R para determinar la confiabilidad del sistema de medición y reducir la variabilidad producida por el mismo:

1) *Estudio Gage R&R aplicado a la medición de la Longitud de Corte:* La medición se realiza después del proceso de corte realizado en la prensa excéntrica. Para la realización del estudio se usa un diseño cruzado donde se eligen a dos operarios de forma aleatoria, los cuales empleando el Vernier realizan la medición de diez barras cortadas. Cada operario realiza tres mediciones por barra de manera aleatoria. La Fig. 4 muestra que el valor del p-value para Operador y la interacción entre Parte y Operador es mayor a 0.05 por lo que la contribución del error de los operadores se puede considerar no significativa, lo cual se comprueba, con un porcentaje de contribución de 0%. La variación proveniente de la repetibilidad es de 3.58 %, mientras que de la reproducibilidad es de 0.00 %. La variabilidad entre partes diferentes representa el 96.42% de la variabilidad total. Por otro lado, el número de categorías distintas es 7, lo cual indica que el sistema de medición tiene una resolución adecuada. Finalmente, el porcentaje de contribución total del Gage R&R es de 3.58%, lo cual indica que el sistema es aceptable, ya que se encuentra en el rango de 0 a 10%.

2) *Estudio Gage R&R aplicado a la medición de la Altura de Cabeza:* La medición se realiza después del proceso de forjado realizado en la prensa de fricción. Para la realización del estudio se usa un diseño cruzado donde se eligen a dos operarios de forma aleatoria, los cuales empleando el Vernier Digital realizan la medición de diez barras cortadas y forjadas en la matriz. Cada operario realiza 3 mediciones por parte de manera aleatoria. La Fig. 5 muestra que el valor del p-value para Operador y la interacción entre Parte y Operador es mayor a 0.05 (p-value = 0.982) por lo que la contribución del

error de los operadores no es significativa, lo cual se comprueba, con un porcentaje de contribución de 0%.

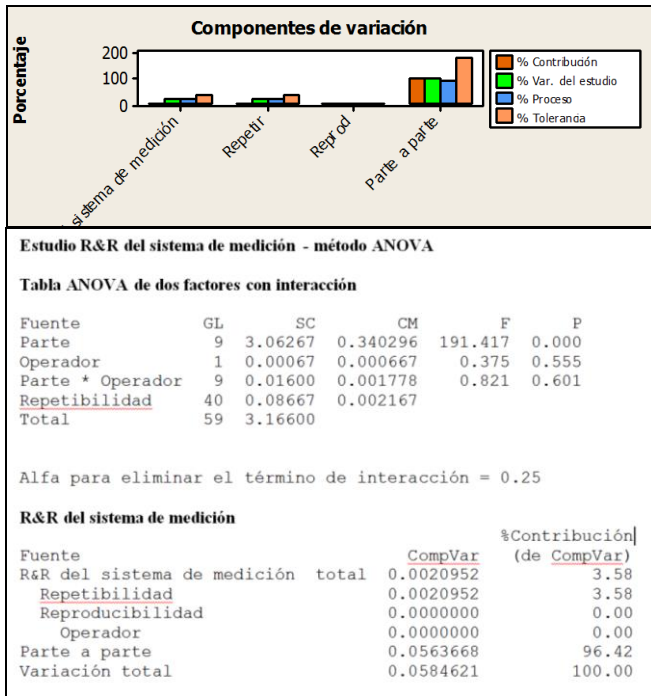


Fig. 4 Reporte de Minitab del estudio R&R para la Longitud de Corte

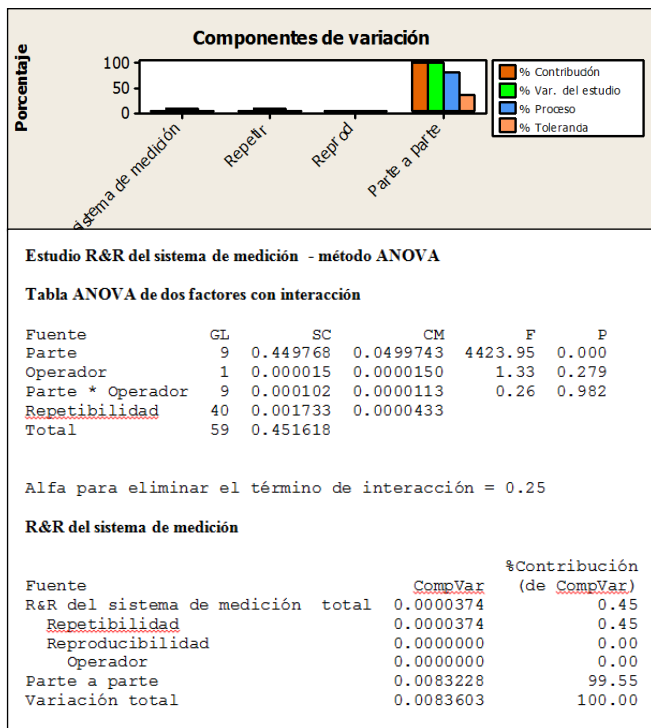


Fig. 5 Reporte de Minitab del estudio R&R para la Altura de Cabeza

La variación proveniente de la repetibilidad es de 0.45 %, mientras que de la reproducibilidad es de 0.00 %. La variabilidad entre partes diferentes representa el 99.55% de la

variabilidad total. Por otro lado, el número de categorías distintas es 21, lo cual indica que el sistema de medición tiene una resolución adecuada. Finalmente, el porcentaje de contribución total del Gage R&R es de 0.45% lo cual indica que el sistema es aceptable.

Con el sistema de medición aceptable, se determinaran las gráficas de control de la media muestral y rango (Xbarra-R). Estas cartas de control detectan los cambios que se originan en el proceso a lo largo del tiempo y determinará si el proceso se encuentra bajo control estadístico:

1) *Gráfica de control para la Longitud de Corte:* La cantidad de muestras es 25. Cada una tiene un tamaño de muestra de 3. La extracción de datos es consecutiva. En la Fig. 6, se observa que, en la gráfica de control, el proceso se encuentra bajo control ya que los valores considerados en las muestras no superan los límites de control establecidos. Adicionalmente el Minitab no muestra ninguna alarma a las pruebas de aleatoriedad de los datos.

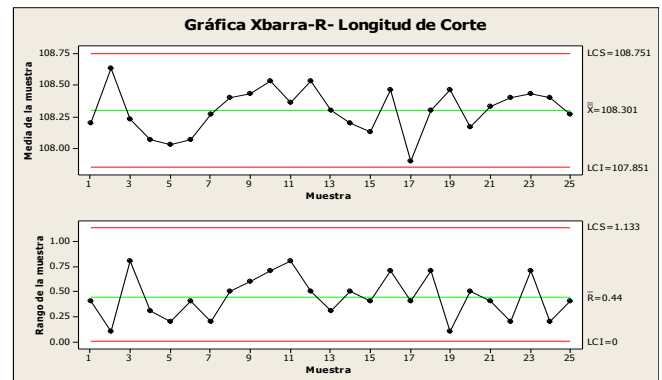


Fig. 6 Gráficas de Control para la Longitud de Corte.

2) *Gráfica de control para la Altura de Cabeza:* Para el presente análisis, se tomaron 25 muestras y para cada una se realizaron 3 réplicas. Fig. 7, se observa, en la gráfica de control, un punto fuera de los límites de control establecidos. Se determinó que los puntos que estaban fuera de control correspondían a muestras posteriores a una parada de máquina. Teniendo en cuenta lo anterior, se recalcularon las gráficas de control obteniendo los resultados de la Fig. 8, en la cual se observa que todos los puntos se encuentran dentro de los límites de control. El Minitab no muestra ninguna alarma a las pruebas de aleatoriedad de los datos.

Finalmente, se concluye que los procesos de Corte y Forjado presentan estabilidad y se encuentran bajo control estadístico considerando ambas variables.

Con la estabilidad del proceso verificada, se determinó la capacidad de los procesos de Corte y Forjado, los cuales se encuentran asociados a la Longitud de Corte y Altura de Cabeza, respectivamente. Previamente, se comprobó que las muestras realizadas a ambos procesos sigan una distribución normal. Se utilizó la prueba de normalidad de Anderson-Darling la cual mostró un valor de p-value de 0.078 y 0.797

para la Longitud de Corte y Altura de Cabeza, respectivamente, siendo valores mayores a 0.05.

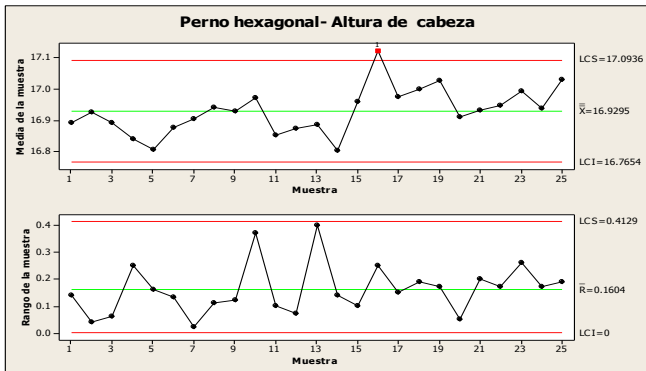


Fig. 7 Gráficas de Control para la Altura de Cabeza.

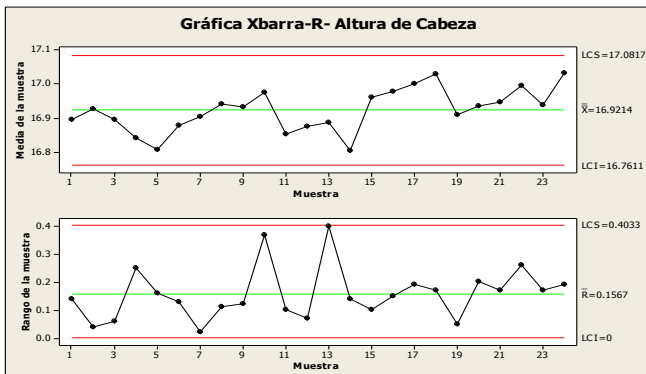


Fig. 8 Gráficas de Control recalculadas para la Altura de Cabeza.

1) *Capacidad de proceso para la Longitud de Corte:* En la Fig. 9, se observa un valor de Cp de 0.52, por lo que el proceso no es potencialmente capaz. Además las colas izquierda y derecha caen fuera de los límites de especificación. El PPM total del proceso es 168541.38. Esta cantidad representa el número de productos se encuentran fuera de especificación en un lote de un millón.

2) *Capacidad de proceso para la Altura de Cabeza:* En la Fig. 10, se observa un valor de Cp de 0.48. Este valor determina que el proceso no es potencialmente capaz. Además las colas izquierda y derecha caen fuera de los límites de especificación. El PPM total del proceso es 168818.34.

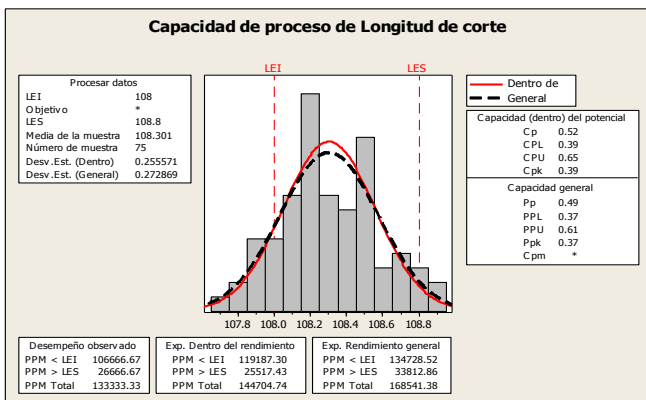


Fig. 9 Gráfico de Capacidad de Proceso para la Longitud de Corte.

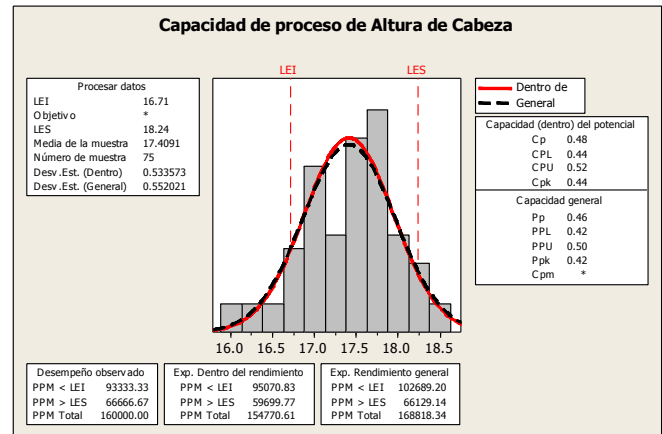


Fig. 10 Gráfico de Capacidad de Proceso para la Altura de Cabeza.

### C. Fase de Análisis

En esta fase, se identificarán las causas raíces de la variabilidad de las medidas con la aplicación del Diagrama de Ishikawa. Posteriormente, se planteará y desarrollará un Diseño de Experimento para el proceso crítico y su respectiva variable. Finalmente, se identificarán los factores que tienen efectos principales sobre la variable del proceso crítico y se modelará una ecuación de predicción.

1) *Identificación de las Causas Raíces:* En la fase de medición, se determinó que los procesos de Corte y Forjado no son potencialmente capaces. Para determinar las fuentes de variación, se realizó un Diagrama de Ishikawa.

*Diagrama de Ishikawa para la variación de la Longitud de Corte:* Para el proceso de Corte realizado en la Prensa Excéntrica, debido a la longitud total de la barra de acero SAE 1045, se emplean sujetadores que brinden estabilidad de tamaño y peso al momento de realizar el corte. Debido a las cargas soportadas y el uso, los sujetadores se encontraron desnivelados. Adicionalmente el peso de la barra de acero SAE 1045 puede requerir ser manipulada por dos operarios para el proceso de corte. En el puesto de trabajo, se encontró baja iluminación y la máquina, además de tener 10 años de antigüedad, no le permite al operario tener una buena visión para realizar una longitud de corte exacta y precisa. Una adecuada preparación de la matriz de corte en la prensa permite realizar hasta 500 cortes hasta la siguiente preparación. La longitud de corte es calculada por el área de Ingeniería y Desarrollo de la empresa a través de cálculos, sin embargo no son consideradas algunas de las causas descritas anteriormente.

*Diagrama de Ishikawa para la variación de la Altura de Cabeza:* La cabeza hexagonal del perno estructural ASTM A325 es formada a partir de la barra de acero cortada SAE 1045, con la cabeza calentada previamente en el horno, mediante la deformación plástica del material por impacto de la Prensa de Fricción. En base al diagrama, se logró identificar que el operario de forja debido a su poca experiencia y las condiciones del puesto de alta temperatura y contaminación debido a la antigüedad del horno, no puede distinguir bien la tonalidad adecuada que permite la deformación plástica

adecuada. La matriz para la prensa de fricción tiene la forma adecuada con las medidas del perno, puede ser fabricada por la empresa o comprada a proveedores. Esta matriz puede deformar entre 500 a 600 piezas dependiendo del diámetro de la barra de acero SAE, un diámetro mayor representa un mayor desgaste de la matriz. Esta matriz a pesar de su dureza sufre deformaciones en el tiempo debido a que absorbe la temperatura de la pieza y sede a los impactos de la prensa. Dependiendo de la longitud de corte, se produce la medida de la altura de la cabeza. Si la longitud de corte no es suficiente, la matriz no puede llenar el total de la altura de la cabeza; lo que origina la pérdida de la pieza al no poder ser reprocesada después del calentamiento. Si la longitud de corte excediera lo necesario, la pieza produciría rebaba la cual puede ser retirada después en un proceso de mecanizado. Si la pieza fuera calentada a una temperatura mayor a la necesaria, se formaría cascarillas y grietas en el enfriamiento reduciendo las medidas de la pieza, si la temperatura de la pieza fuera menor a la necesaria, se requiere un mayor esfuerzo de la prensa y muchas veces la altura de la cabeza es mayor.

2) *Diseño de Experimento*: El proceso de forja representa un proceso crítico en la producción, debido a que la barra de acero SAE 1045 es calentada en temperaturas mayores a 700 °C. La materia prima en proceso sufre dilataciones e impactos por lo que no puede ser reprocesado. En conclusión el diseño de experimentos será realizado para el proceso de forjado.

De acuerdo al análisis de gráficas de control, capacidad de proceso y diagrama de Ishikawa, la variable dependiente será la Altura de Cabeza del perno estructural ASTM A325. Los factores del experimento son: La Temperatura de la barra de acero cortada en el proceso de Forjado, la Longitud de Corte en el proceso de Cortado y la Matriz de la prensa excéntrica en el proceso de Forjado.

Una vez identificados la variable dependiente y los factores, se empleará un diseño de experimentos factoriales completo, con tres factores (k=3), 2 niveles para cada factor y 2 réplicas para cada experimento.

En la Tabla VII, los resultados indican que la Longitud de Corte y la Temperatura son estadísticamente significativos para la Altura de la Cabeza al tener un p-value menor a 0.05, por lo tanto, si la Matriz es de la empresa o de un proveedor, no es significativo estadísticamente. Ninguna de las tres interacciones de los factores resultó significativa.

3) *Validación del Modelo de Regresión*: Se descartó los factores que no son significativos estadísticamente, como la matriz de la prensa excéntrica. A partir de los factores de efectos principales significativos se obtuvo la siguiente expresión mostrada en la Figura 11. El valor de R-cuad. (Ajustado) de 84.0% indica el porcentaje de variación de la respuesta explicada por el modelo. Los valores que optimizan la medida de la Altura de la Cabeza: Temperatura de la pieza debe ser 1100 °C y la Longitud de corte debe ser de 108.79 mm. Con estos valores se obtiene 17.48 mm, valor nominal, de Altura de Cabeza. La matriz de la prensa de fricción no presenta efecto.

TABLA VII  
Análisis de Varianza DOE

Término	Efecto	Coef	SE Coef	T	P
Constante		17.495	0.06032	290.01	0
Temperatura	-0.605	-0.3025	0.06032	-5.01	0.001
Longitud de corte	0.77	0.385	0.06032	6.38	0
Matriz	0.025	0.0125	0.06032	0.21	0.841
Temperatura*Longitud de corte	-0.19	-0.095	0.06032	-1.57	0.154
Temperatura*Matriz	-0.03	-0.015	0.06032	-0.25	0.81
Longitud de corte*Matriz	0.005	0.0025	0.06032	0.04	0.968
Temperatura*Longitud de corte*Matriz	0.005	0.0025	0.06032	0.04	0.968

S = 0.2411299 R-cuad.(pred.) = 58.15% R-cuad. (ajustado) = 80.38%

**Análisis de regresión: Altura de Cabeza vs. Temperatura, Longitud de corte**

La ecuación de regresión es  
 Altura de Cabeza = 5.17 + 0.00151 Temperatura + 0.128 Longitud de corte

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constante	5.170	2.001	2.58	0.023
Temperatura	-0.0015125	0.0002722	-5.56	0.000
Longitud de corte	0.12833	0.01815	7.07	0.000

S = 0.217768 R-cuad. = 86.2% R-cuad. (ajustado) = 84.0%

Análisis de varianza

Fuente	GL	SC	CM	F	P
Regresión	2	3.8357	1.9178	40.44	0.000
Error residual	13	0.6165	0.0474		
Total	15	4.4522			

Fig. 11 Reporte de Minitab del Análisis de Regresión

#### IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la fase de análisis, se desarrolló el diseño de experimentos para la obtención del valor nominal de la Altura de cabeza. Para esta variable, se definieron tres principales factores: Longitud de corte, Temperatura del horno y Matriz de prensa de fricción.

La Figura 12 muestra que la respuesta óptima se obtiene al usar una Temperatura de 1300 °C, Longitud de corte de 112 mm y la matriz elaborada por la empresa. Esta propuesta se rechaza debido a dos razones:

1) *Primera Razón*: Se requiere maximizar el valor del factor Temperatura lo cual implica un gasto adicional en la combustión del horno para el proceso de forjado. Consecuentemente, se corre el riesgo de que la pieza se descascare luego del enfriamiento.

2) *Segunda Razón*: Al maximizar el valor del factor Longitud de Corte, se requiere un exceso de la materia prima barra de acero SAE 1045 en el proceso de corte, el cual será retirado en un proceso adicional de mecanizado por presentar



excesos como rebabas. Esto genera tiempos adicionales y la pérdida de materia prima.

## V. CONCLUSIONES

La metodología DMAIC permitió identificar los procesos críticos de la producción del perno estructural ASTM A325: Corte y Forjado. El perno estructural ASTM A325 fue elegido por ser el producto más representativo de la familia de pernos estructurales y hexagonales, los cuales representan las mayores ventas valorizadas en soles.

Se realizó una encuesta a los principales clientes para que a través del Modelo de Kano se identifique los requerimientos críticos del cliente (CCR) los cuales eran que el producto cumpla con las especificaciones y que se entregue a tiempo.

Mediante el AMFE se identificó las variables de los procesos para la producción del perno estructural. Las variables que fueron medidas y analizadas tuvieron los valores más altos en la TGN: Diámetro Exterior, Longitud de Corte y Altura de Cabeza.

Se evaluó el sistema de medición de las variables Longitud de Corte y Altura de Cabeza siendo aceptables al encontrarse entre el 0 y 10% de porcentaje de contribución total.

Se determinó que los procesos de corte y forjado se encontraban bajo control estadístico. Mediante la prueba de normalidad Anderson-Darling se determinó que ambas variables seguían una distribución normal.

Se realizó el estudio de las capacidades de los procesos, siendo los procesos de ambas variables, incapaces y obteniendo un PPM mayor a 168000.

Mediante el diagrama de Ishikawa se determinó que el exceso de la Longitud de Corte en el proceso de corte mayor al LES genera rebabas en procesos posteriores por el exceso de acero, una longitud de corte menor al LEI genera que el producto no pueda cumplir con las demás especificaciones al no contar con suficiente acero. Una temperatura mayor en el forjado implica la formación de cascarillas y grietas en el enfriamiento reduciendo las medidas de la pieza, una temperatura menor implica un mayor esfuerzo de la prensa.

Mediante el DOE se determinó la variable dependiente, la altura de cabeza, y los 3 factores: temperatura, longitud de corte y matriz de prensa excéntrica. Los resultados indican que no existe una interacción entre los factores. Mediante la regresión se determinó los valores de los factores que optimizan la Altura de la Cabeza. Para cada una de las fases realizadas del DMAIC fue necesaria la participación, a través de entrevistas o piezas de prueba, de todo el personal de la empresa en estudio en los niveles directivo, supervisores, jefes y operarios. Con la participación del personal se obtiene la situación actual de la empresa, el conocimiento del proceso a mejorar al detalle.

## REFERENCES

- [1] Ministerio de la Producción (2012). "Boletín Estadístico Diciembre 2012". Perú: Lima.
- [2] Leonel, A. M., Liliana M. P., Juan Carlos C.B. (2008). "Aplicación de Six Sigma en las organizaciones". Scientia Et Technica, Vol. XIV, 38, pp. 265-270.
- [3] Escalante, E. (2003). "Seis-Sigma: Metodología y Técnicas". México: Limusa.

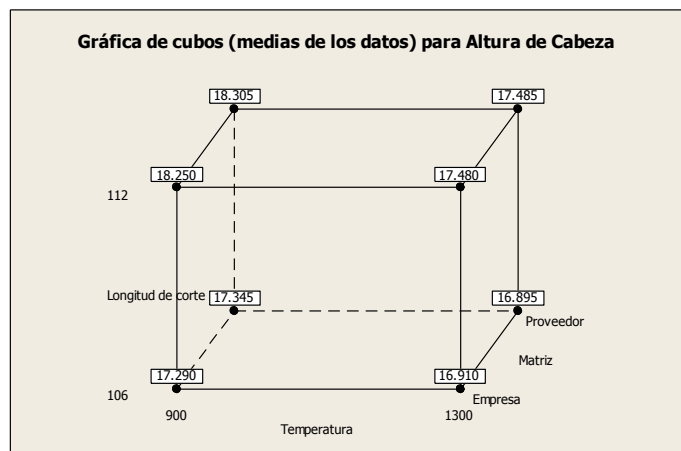


Fig. 12 Gráfica cubos para Altura de Cabeza

Por las razones expuestas, en la Figura 13 se observa una gráfica de optimización. En esta gráfica se concluye que para obtener una Altura de Cabeza de 17.48 mm, valor nominal; la Temperatura de la pieza, en el proceso de forjado, debe ser 1100°C; se debe cortar a 108.79 milímetros la barra de acero SAE 1045 y utilizar una Matriz elaborada por el proveedor.

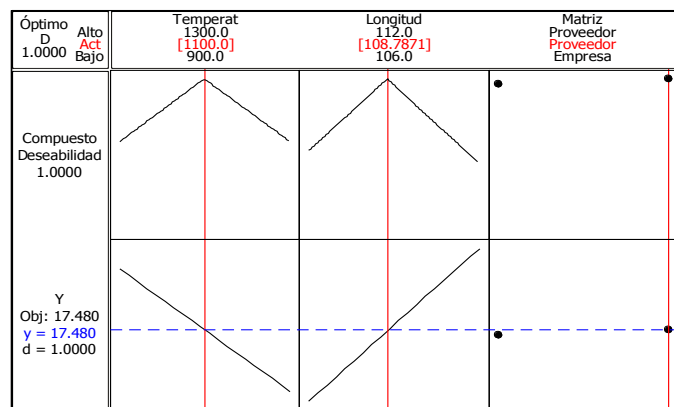


Fig. 13 Gráfica de Optimización

Cuando se aplique una Temperatura de la pieza menor a 1100°C, manteniendo constante la Longitud de corte y la Matriz fabricada por el proveedor, se incrementará la Altura de Cabeza.

Cuando se aplique una Temperatura de la pieza mayor a 1100 °C, manteniendo constante la Longitud de corte y la Matriz fabricada por el proveedor, se podrá optimizar la Altura de la Cabeza pero irá disminuyendo con el tiempo.

Cuando se establece una Longitud de corte mayor a 108.79 mm y manteniendo la Temperatura de la pieza y la Matriz fabricada por el proveedor, se obtendrá una Altura de Cabeza mayor al valor nominal, 17.48 mm.

Cuando se establece una Longitud de corte menor a 108.79 mm, manteniendo la Temperatura de la pieza constante y la matriz fabricada por el proveedor, se obtendrá una Altura de Cabeza menor al valor nominal, 17.48 mm.

- [4] De Feo, J., Barnard, W. (2004). "Más allá de Seis Sigma". España: Madrid.
- [5] Gitlow, H.S. (2005); "*Six Sigma for Green Belts and Champions: Foundations, DMAIC, Tools, Cases, and Certification*". Pearson Prentice Hall, New Jersey.