



Nota técnica

Diseño y desarrollo de dispositivo de sujeción hidráulica para el proceso de brochado

Design and development of hydraulic clamping device for broaching process



Jorge Alberto Morales Martínez¹ , Carlos Alberto Marin Álvarez¹ , Raúl Pérez Bustamante² 

¹Posgrado CIATEQ, A.C., San Agustín del Retablo 150, Constituyentes Fovissste, 76150 Santiago de Querétaro, Querétaro, México

²CONACYT-COMIMSA-CIATEQ, A.C., Eje 126 225, Zona Industrial San Luis, 78395 San Luis, San Luis Potosí, México

Autor de correspondencia: Jorge Alberto Morales Martínez, Posgrado CIATEQ, A.C., San Agustín del Retablo 150, Constituyentes Fovissste, 76150 Santiago de Querétaro, Querétaro, México. E-mail: jorge_moralesmtz@hotmail.com. ORCID: 0009-0000-5050-2576

Enviado: 19 de Agosto del 2023

Aceptado: 16 de Octubre del 2023

Publicado: 7 de Noviembre 2023

Resumen. - Se desarrolló un dispositivo de sujeción hidráulica para el proceso de brochado de Brackets usados en los sistemas de frenado de automóviles, que permite reducir la variación del proceso de corte al mejorar el sistema de sujeción y con ello limitar la deformación de la pieza luego de haber sido procesada. Con este concepto de dispositivo es posible mejorar las condiciones del proceso de producción, como lo son: velocidad de corte, reducción de tiempo ciclo, rendimiento de la operación, reducción de costo de scrap, y reducción de tiempo muerto por sobre ajuste de proceso y cambio de modelo. Adicional, se hizo el desarrollo de un sistema de detección de pieza presente que permite captar cuando una pieza no es colocada correctamente en el dispositivo antes de iniciar el ciclo de corte, con esto es posible detectar fallas en el proceso que representen un riesgo para la operación. Durante la etapa de diseño se realizó una simulación del proceso de maquinado en condiciones extremas y condiciones ideales para medir la deformación de la pieza y con esto obtener los parámetros adecuados de corte para la puesta en marcha del dispositivo de sujeción. Para la validación del modelo, se realizó un estudio de habilidad de proceso Cpk y Ppk (acorde a los requerimientos de cliente) para evaluar que el nuevo proceso es eficiente y se encuentra bajo control.

Palabras clave: Dispositivo de sujeción; Proceso de brochado; Bracket; Sistema de frenado; Parámetros de corte; Cpk; Ppk.

Abstract. - A hydraulic clamping device was developed for the broaching process of Brackets used in automotive braking systems, which allows reducing the variation of the cutting process by improving the clamping system and thereby limiting the deformation of the piece after having been processed. With this concept of device, it is possible to improve the conditions of the production process such as: cutting speed, cycle time reduction, operation performance, scrap cost reduction, and downtime reduction due to process over-adjustment and change over. Additionally, the development of a part detection system was made that allows capturing when a part is not correctly placed in the device before starting the cutting cycle, with this it is possible to detect failures in the process that represent a risk to the operation. During the design stage, a simulation of the machining process was carried out in extreme conditions and ideal conditions to measure the deformation of the part and with this obtain the appropriate cutting parameters for the implementation of the clamping device. For the validation of the model, a Cpk and Ppk process ability study was carried out (according to customer requirements) to assess that the new process is efficient and is under control.

Keywords: Clamping device; Broaching process; Bracket; Brake system; Cutting parameters; Cpk; Ppk.



1. Introducción

La optimización de procesos es un elemento clave para el desarrollo de una empresa, ya que permite mejorar la eficiencia y eficacia de los procesos de producción, reduce los costos de la pobre calidad (costos de prevención, costos de evaluación, costos de fallas internas y costos de fallas externas), busca mejorar los márgenes de ganancia, reducir los desperdicios generados como: retrabajos, tiempos, inventarios, defectos, y aporta a la obtención de los altos estándares de calidad [1].

Un proceso productivo consiste en una serie de actividades y procedimientos relacionados entre sí, implementados por las empresas, cuyo objetivo es transformar las entradas como recursos materiales, información, etc., en salidas que pueden ser bienes o servicios [1].

La necesidad de optimización de un proceso productivo nace a partir de la identificación de un problema, o bien, se busca incrementar su eficiencia y/o productividad.

Partiendo de esta premisa, si el objetivo se centra en incrementar la eficiencia operacional de una compañía, es necesario hacer uso de las nuevas tecnologías para mejorar los equipos, y así mismo, las condiciones de producción [1].

Hacer uso de las nuevas tecnologías de diseño y fabricación, trae grandes beneficios para las empresas ya que impacta en los ingresos, eficiencia operativa e impulsa al rendimiento empresarial.

Es importante mencionar que la industria en México ha tenido un auge considerable durante los últimos años. Como se observa en la Figura 1, según cifras del gobierno de México, tan solo en el 2021 la producción industrial se elevó en 10 de las 32 entidades federativas que integran la República Mexicana en abril de 2021 respecto al mes previo, sobresaliendo Tlaxcala con 6.6%; seguido de Tabasco con 5.4%, Chiapas con 3.7%, Querétaro con 3.2% y Veracruz con 3.1% [2].

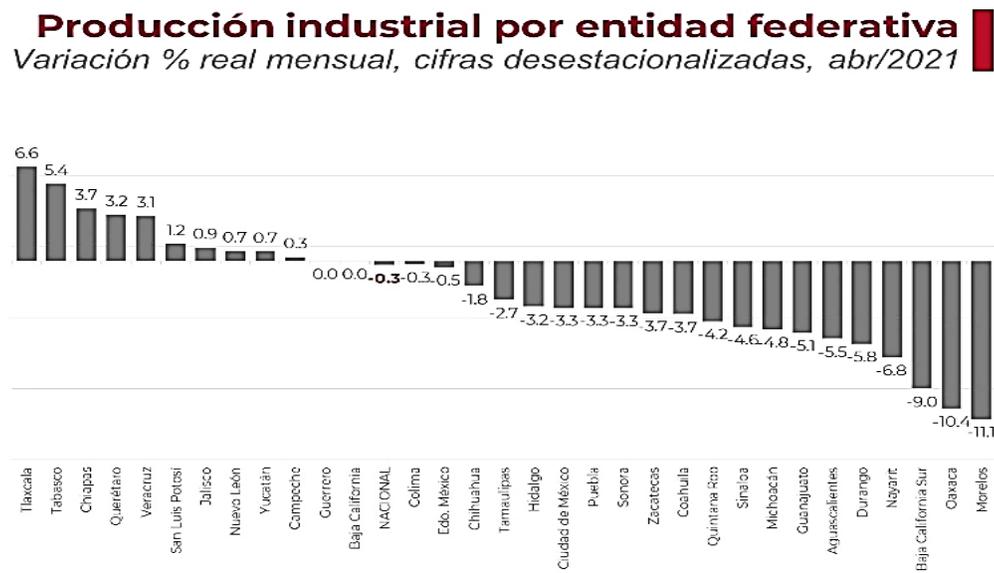


Figura 1. Producción industrial en México 2021 [2].



De igual manera, con cifras originales y con relación al mismo mes del año anterior, la actividad industrial avanzó en 30 entidades federativas de nuestro país en abril de 2021 (ver Figura 2), destacando Puebla (+111.5%), Aguascalientes (+98.5%), Coahuila (+75.9%), Guanajuato (+73.3%) y San Luis Potosí (+69.1%); en tanto que Colima y Campeche fueron los únicos estados que reportaron contracción anual en su actividad económica de 0.4% y 4.3%, respectivamente [2].

Con los avances tecnológicos ha sido posible implementar cambios o mejoras significativas en un proceso de producción con un menor riesgo. Pues con estas nuevas herramientas es posible evaluar los impactos de un cambio, así como, la fiabilidad del modelo, el costo estimado de inversión, el análisis de riesgo y la estrategia de manufactura a utilizar.

proceso de fabricación. En lo que concierne al marketing, las imágenes en alta definición obtenidas en el modelo 3D pueden utilizarse en manuales, campañas publicitarias y en otras acciones estratégicas [3].

Un modelo 3D es la representación abstracta de un objeto, incluyendo su estructura, atributos y leyes de variación entre los componentes. Los modelos 3D son la cuarta generación de contenidos multimedia antecedida por audio, imágenes y video. Un modelo 3D representa un objeto tridimensional basado en una colección de puntos en el espacio, conectado por varias entidades geométricas [4].

El carácter tridimensional de un objeto requiere, a diferencia de uno bidimensional, de un sistema de medición que pueda abordar, de manera global, la multiplicidad de medidas necesarias para el registro de sus tres dimensiones, por complejo que este sea.

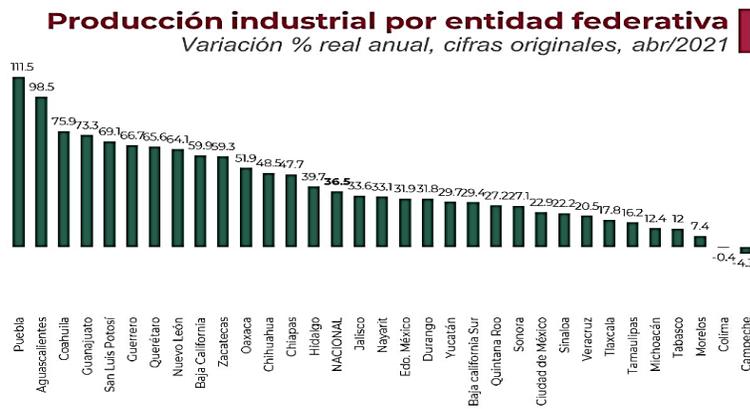


Figura 2. Producción industrial por entidad federativa 2021 [2].

Con el desarrollo de estas nuevas tecnologías en el sector industrial, se ha creado un nuevo modelo de negocio en el que el prototipado es un factor importante para mejorar la rentabilidad de una compañía. Mediante el diseño 3D, es posible simular el funcionamiento de sistemas montados, así mismo, se puede predecir y corregir posibles problemas de funcionamiento y planear el

Este sistema de medición sólo es posible mediante la implementación de herramientas digitales, lo que conocemos como digitalización 3D que permite la obtención de datos de profundidad, es decir, mediciones tridimensionales. Estos datos deben ser lo más precisos posibles ya que la falta de precisión puede conducir a una pérdida de información y



como resultado, a una interpretación errónea de la realidad de la pieza [5].

Un modelo permite al equipo de trabajo a comunicar la visión del sistema que se está construyendo. Es muy difícil compartir una misma visión si solo se cuenta con especificaciones textuales. Algo muy importante, es que permite documentar las decisiones tomadas y son una herramienta que apoya al sistema a largo plazo. Pues, las decisiones tomadas ya no dependen de la memoria del generador del modelo [6].

Con la llegada del diseño 3D, ha sido posible generar una serie de innovaciones en muchas ramas del sector industrial, una de ellas está enfocada en los dispositivos de sujeción hidráulica que son empleados en los procesos de mecanizado de alta velocidad.

Un sistema de sujeción hidráulica (Fixture), es un dispositivo usado para localizar, sujetar y dar soporte a la pieza durante el ciclo de maquinado, ensamble o inspección. Los criterios más importantes para la fijación son la estabilidad de la pieza de trabajo, precisión de posición y deformación de la pieza de trabajo [7].

Estos sistemas de sujeción hidráulica utilizan líquidos a alta presión para accionar abrazaderas y elementos hidráulicos que permiten sujetar una pieza, y así mitigar las fuerzas que intervienen en el proceso de mecanizado [7].

La sujeción hidráulica tiene muchas ventajas sobre la sujeción mecánica. En la mayoría de los casos, estos beneficios permiten reducir costos durante la manufactura de componentes, que les permiten justificar la inversión inicial de un sistema de sujeción hidráulico. El uso de las nuevas tecnologías, como la sujeción hidráulica, ha permitido a las empresas generar procesos productivos más estables y predecibles sin

importar quién sea el operador o en qué turno de producción trabajó la máquina [7].

Los componentes mecanizados normalmente requieren dispositivos dedicados en lugar de dispositivos de uso general debido a que las piezas en ocasiones presentan geometrías complejas. El desarrollo de un dispositivo adecuado en la producción de lotes grandes, como el sector automotriz, está impulsado por requisitos exigentes: precisión, fiabilidad y bajo tiempo de configuración, por lo que aspectos como la flexibilidad, la configuración, la adaptabilidad o la automatización se vuelven un factor de suma relevancia que las cuestiones puramente económicas [8].

La investigación sobre dispositivos de mecanizado se centra en el diseño del dispositivo, el análisis de la fuerza de sujeción y el control de sujeción-deformación. Los accesorios se pueden diseñar y fabricar de acuerdo con la estructura y el procesamiento de mecanizado de una pieza de trabajo. La fuerza de sujeción afecta directamente el resultado del maquinado de la pieza a trabajar, pues esta fuerza de sujeción debe ser adecuada para garantizar que el maquinado sea estable y no comprometa la calidad de la pieza [9].

Es importante mencionar que los dispositivos de sujeción hidráulica proporcionan una fuerza consistente, repetitiva en un paquete pequeño y liviano, Esto significa en el ambiente actual de manufactura que la pieza puede ser asegurada en menos tiempo, con precisión y sin sacrificar el valioso espacio del dispositivo. La sujeción hidráulica también optimiza la carga y descarga de las partes en el proceso [9].

La aplicación de nuevas tecnologías en la manufactura de sistema de sujeción ha hecho posible crear elementos más eficientes que se adecuen a las necesidades del cliente y del



mercado. Permitiendo más versatilidad en la etapa de planeación y diseño, así como, la integración de equipos multidisciplinarios que aporten o realicen cambios en tiempo real. Este esquema es de suma importancia, pues en cada proyecto las áreas multidisciplinarias deben estar al tanto de las decisiones que se toman durante la vida del proyecto.

Algunos de los softwares más utilizados en el proceso de fabricación de sistemas de sujeción son *Solidworks* [10], *Autocad* [11] y *Mastercam* [12].

Los softwares, no son la única tecnología empleada en la manufactura de sistemas de sujeción. También los avances tecnológicos en hardware han hecho posible la fabricación de componentes, así como, han fomentado la creatividad del diseñador al permitir la producción de componentes más innovadores a menor costo y a menor riesgo [9].

Algunos de los equipos más utilizados en la industria son maquinaria CNC [13], herramientas de corte [14] y de mecanizado CNC [15].

Es importante mencionar que estos avances en materia de desarrollo tecnológico (diseño 3D & fabricación de nuevos sistemas de sujeción) y el constante crecimiento industrial a nivel global, han permitido generar sistemas productivos más eficientes y robustos, que puedan hacer a las compañías más rentables, generar mayor productividad y ganar más mercado.

El objetivo del presente proyecto es diseñar y fabricar un dispositivo de sujeción para el proceso de brochado de Brackets que permita hacer el proceso de producción más eficiente, es decir, incrementar el OEE (*Overall Equipment Effectiveness*) de la línea de producción al menos a un 75%. De igual manera, reducir el desgaste excesivo de la herramienta de corte, evitar la

deformación de la pieza después del maquinado y mejorar la habilidad de proceso.

Un ejemplo de investigación para la mejora de procesos de producción es el trabajo de CM. Patel [16], en donde fue posible identificar como se hace uso de una metodología estructurada del diseño 3D permitiendo hacer más eficiente el proceso de producción de dispositivo hidráulico de 8 cilindros al reducir el tiempo ciclo de operación. De igual manera, permitió reducir la fatiga generada al personal operativo, incrementar la productividad y reducir el desgaste excesivo de los componentes que interactúan con la pieza durante la fijación.

De igual manera, el trabajo de T. Seelbach [17], presenta un enfoque innovador que combina un modelo empírico-analítico de fuerzas de corte y simulaciones de numéricos de elemento finito para modelar las deformaciones elásticas durante el proceso de corte. En este experimento, la información empírica de las fuerzas de corte se utiliza como datos de entrada para las simulaciones de elemento finito. Los resultados se analizaron respecto a las tolerancias de forma y posición del perfil de las ranuras del disco. La investigación presenta un estudio de parámetros de corte sobre los parámetros de la pieza de trabajo y el proceso, así como, su impacto con respecto a la precisión geométrica en el brochado para el maquinado de discos de turbina [17].

2. Metodología

La metodología empleada en el presente trabajo está estructurada como se muestra en la Figura 3.

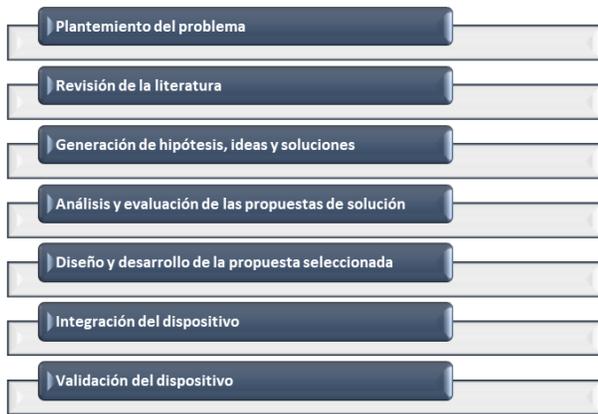


Figura 3. Diagrama de flujo de la metodología empleada en el desarrollo del dispositivo.

2.1 Diseño y desarrollo

Como primer paso se recolectó información del comportamiento del procesos desde el arranque de producción, se buscaron antecedentes de los indicadores de productividad como el OEE (*Overall Equipment Effectiveness*), tiempos de paro, inventarios, costos de reparación y costos por scrap. Una vez definidos, se decidió tomar los últimos seis meses 6 meses para segmentar el análisis. El objetivo principal de seleccionarla fue analizar el comportamiento del proceso con respecto a la población de la que proviene. Adicional a eso, se hizo una evaluación de los principales factores que afectaban la productividad del proceso, así como, los impactos de calidad generados y el rendimiento por herramienta.

El segundo paso fue discriminar las variables con ayuda de una matriz de priorización, y así realizar una investigación documental de las variables que afectaban directamente en la productividad del proceso, por lo que estas debieron considerarse en el diseño y desarrollo del dispositivo. Además, se estudiaron los principales factores que contribuían en el rendimiento por herramienta.

Del análisis realizado se identificó que el rendimiento mensual promedio de la línea de producción era de un 58% de OEE (*Overall Equipment Effectiveness*) contra un target del 75% que se tiene establecido, para esta estimación se tomó el histórico de producción promedio del periodo de junio 2022 a febrero 2023.

Dentro del mismo análisis se identificó que el principal contribuyente al costo de scrap era la variación que se tenía en el “Spam” de brochado, esto debido a la deformación presentada en la pieza después del ciclo de maquinado. La condición descrita era causada por las fuerzas de sujeción que intervenían en la secuencia de apriete durante el mecanizado y a las deficiencias en el diseño del dispositivo de sujeción empleado en el proceso.

En la figura 4 se describen las características del producto:

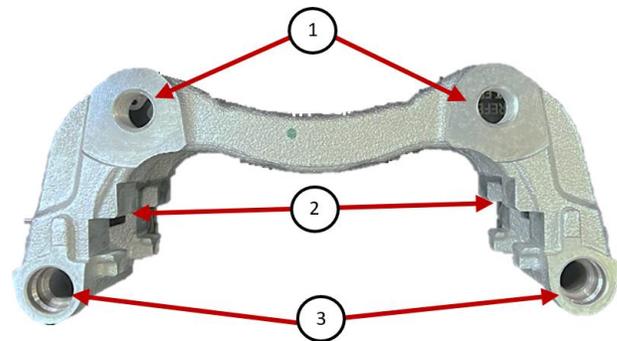


Figura 4. características del producto.

Descripción:

1. Barrenos de montaje para ensamble en chumacera de automóvil
2. Spam de brochado para ensamble de balata
3. Barreno para ensamble de Bracket con el Housing

La precisión es una de las cuestiones más importantes en el mecanizado de componentes,



siendo la deformación de la pieza la principal causa de rechazo. Se ve afectado por las distorsiones geométricas que se producen durante el procesamiento, siendo esa deformación relacionada con la existencia de tensiones residuales (fuerzas internas) y condiciones de contorno de sujeción (fuerzas externas). En esta situación, el origen de la distorsión geométrica puede ser [8]:

- Deformación causada por un cambio en el estado de tensión residual generado por procesos de fabricación anteriores del componente. Esto está asociado a la eliminación del material durante los procesos de mecanizado que conduce a un nuevo equilibrio interno del componente.
- Deformación causada por cargas externas (sujeción y fuerzas de corte) que deforman elásticamente la pieza de trabajo durante el procesamiento, siendo recuperadas posteriormente.

Para evaluar la calidad y eficiencia de los procesos de brochado, se han realizado distintos estudios donde se mide el rendimiento de este proceso, así como, las variables que intervienen durante el maquinado. En el trabajo propuesto por F. Zanger [18], se presenta una investigación de los cambios del espesor de corte durante el brochado. En la primera etapa del experimento, se realizaron pruebas variando el espesor de corte con una inclinación de la superficie de corte en relación con la dirección del corte. Para esta primera fase se emplearon diferentes espesores y velocidades de corte. En este experimento se consideró la pieza de trabajo como la parte móvil en lugar de la brocha, la brocha estaba fija.

Los parámetros obtenidos fueron las fuerzas del proceso, la rugosidad del mecanizado, grabaciones superficiales y de alta velocidad del proceso durante brochado. En la segunda fase, se realizaron simulaciones con distintos espesores

de corte. Las salidas tales como los ángulos de corte, se compararon con los datos obtenidos experimentalmente [18].

Acorde al trabajo desarrollado por el autor, haciendo uso de simulaciones de análisis de elemento finito fue posible identificar que las variables de espesor de corte, causado por la vibración de la estructura de la máquina, influyen en las fuerzas específicas del proceso y la calidad de la superficie mecanizada. Así mismo, los resultados de las simulaciones de corte mostraron que durante el mecanizado el ángulo de corte de la herramienta influye en el espesor y calidad del corte [18].

En la Tabla 1 se presenta las principales variables que contribuyen a la deformación que sufre la pieza durante el ciclo de brocha, así como su nivel de criticidad.

Tabla 1. Variables de entrada que interactúan en el proceso de brochado.

Variables	Criticidad
Secuencia de sujeción	Baja
Presiones de sistema mecánico de mesa trasera	Media
Geometría de forja	Media
Dureza de forja	Media
Puntos de referencia del Bracket	Baja
Sistema de medición	Baja
Diseño de dispositivo de sujeción	Alta
Desgaste excesivo de cortador	Media
Fuerza de corte	Baja

Estos niveles de variables se definieron haciendo uso de un diagrama de Ishikawa y una matriz de priorización de segundo nivel. En donde se jerarquizaron las etapas del proceso, es decir, se jerarquizaron las causas que fueron identificadas en el diagrama de Ishikawa.



Con esta herramienta se califico el impacto que tiene cada causa en el proceso. Estas calificaciones se asignaron de 1 a 10, donde 1 representa un impacto muy bajo o nulo y 10 muy alto (pasando por toda la escala).

A partir de los valores anteriores y el impacto la criticidad de la característica en el producto, se calcularon la importancia total para cada etapa del proceso, al multiplicarlos y luego realizando la suma de estos productos. Así, se seleccionan los pasos que en el total tengan el valor más alto o criticidad más alta [19].

Una vez determinada la variable con criticidad alta dentro del proceso de maquinado se procedió a iniciar el estudio para diseñar y desarrollar un nuevo sistema de sujeción para el brochado de Brackets.

En la Tabla 2 se muestran las variables seteadas en el proceso antes del cambio:

Tabla 2. Factores de proceso.

Variabes de proceso	Valor
Fuerza de corte de RAM	50 kN
Sistema de sujeción	Mecánico
Presión de sujeción	50 bar para todas las líneas
Velocidad de corte	8 m/min

Para controlar la deformación de la pieza durante el proceso de corte se determinó desarrollar un dispositivo de sujeción hidráulico que permitiera mitigar el cambio en la tensión residual generado durante el corte e incrementar la fuerza de sujeción para disminuir las cargas externas que deforman elásticamente la pieza de trabajo durante el procesamiento, siendo recuperadas posteriormente.

Una vez seleccionados los elementos críticos que ayudaran a cumplir con las especificaciones deseadas del producto y del proceso, se realizó el modelado mediante el uso de *Solidworks* [20], que consiste en el desarrollo de un dispositivo receptor de Bracket y dos nidos *SMED* (*Single Minute Exchange of Die*) para la sujeción de la pieza. *SMED* es una herramienta de mejora que permite reducir los tiempos de cambio de útiles de forma considerable, lo que se traduce en un aumento de flexibilidad, productividad y eficiencia [21].

Durante el desarrollo de la propuesta se consideró nidos independientes para la sujeción de la pieza, líneas hidráulicas independientes para garantizar el ajuste correcto por modelo y hacer uso de *válvulas check* [22] en cada nido *SMED* para agilizar los cambios de modelo. Esto permitió generar un ahorro económico considerable al reducir el tiempo de paro por cambio de modelo de 360 min a 90 minutos por evento, esto representa una reducción del 75%.

En la búsqueda de garantizar la seguridad del equipo y el dispositivo se diseñó un sistema para la detección de pieza presente (*Air check*) que permita detectar cuando la pieza esta correctamente posicionada en el dispositivo antes de iniciar el ciclo de maquinado. Dentro de las características del sistema de detección de pieza se destaca la conexión independiente por nido a un *presostato* [23] utilizado para cerrar o abrir el circuito en función de la presión o flujo que ejerce el dispositivo para garantizar la unión de los contactos. El objetivo del sistema es evitar daños en los equipos (herramienta de corte, máquina & dispositivo de sujeción) que puedan impactar el negocio de la compañía.

El dispositivo receptor de Bracket consiste en una placa conectora *SMED* de brocha diseñada para recibir los nidos de cambio rápido. En esta placa se integraron elementos que permitieron



garantizar la conexión hidráulica de los nidos haciendo uso de válvulas check. El objetivo de utilizar estos elementos hidráulicos es permitir el flujo de fluidos en una sola conexión, manteniéndose abierta, pero si el flujo del fluido cambia, la válvula se cierra impidiendo el flujo inverso [24]. Adicional, para garantizar el correcto posicionamiento de los nidos de cambio rápido se hizo uso de elementos *Speedloc* (cambio rápido) [25] para permitir el posicionamiento en la placa de fijación sin ataduras ni bloqueos.

Para los nidos de cambio rápido (izquierdo y derecho), al igual que la placa conectora, se hizo uso de válvulas check para garantizar la conexión hidráulica en placa y evitar el flujo inverso de fluido una vez que la válvula es cerrada [24]. Con este sistema se garantiza que no habrá pérdidas de presión durante el ciclo de corte. De igual manera se hizo uso de pistones y soportes de trabajo hidráulicos marca *Vektek*, con capacidad

de soportar presiones de hasta 5000 psi [26] y en el caso de los soportes de trabajo tienen una capacidad de soportar hasta 8,000 lb [27]. Se buscó esta configuración para soportar las cargas externas del RAM y con esto, evitar la deformación elástica de la pieza. El RAM es un cilindro que se desplaza hidráulicamente de manera vertical en la máquina brochadora, que ejerce una fuerza de corte en la pieza al realizar el movimiento. En el RAM es montada la herramienta de corte con la cual es generado el perfil del brochado.

La otra parte del dispositivo consiste en utilizar puntos de contacto con la dureza necesaria para contrarrestar la fatiga y desgaste excesivo en la sujeción de la pieza. El acero AISI D2 tiene un amplio uso en la industria manufacturera debido a su alta dureza, resistencia y propiedades de desgaste [28], otras características y propiedades son:

Tabla 3 Composición química del acero AISI D2 [28].

Estándar	Calificación	C	Si	Mn	Cr	V	Mo
AISI	D2	1.5	0.6	0.6	12	1.0	1

Tabla 4. Propiedades mecánicas del acero AISI D2 [29].

Prueba	Unidad	AISI-D2
UTS	MPa	1489.41
E	GPa	198.24
SY	MPa	1385
S. Fractura	MPa	1390
Deformación	%	0.74
Dureza Vickers	HV	570
Dureza Rockwell	HRC	53.3

La dureza requerida para los puntos de contacto fue de 50 -52 *HRC* [30] con un acabado en óxido negro.

Para la fabricación de los nidos y mesa receptora se utilizó acero 1045. Es un acero grado ingeniería que destaca por su nivel medio de resistencia mecánica y tenacidad. Además, es

maleable a los procesos de maquinado ya que consigue un buen acabado superficial y larga vida útil [31]. Es uno de los aceros mayor empleados en la industria manufacturera, especialmente en la industria automotriz, pues al ser un acero no aleado de medio contenido de carbono es resistente al impacto [31].



El modelo CAD consta de cuatro elementos principales que son:

1. Bloque de soporte trasero
2. Placa receptora
3. Nido SMED LH
4. Nido SMED RH

De igual manera en la Tabla 5 se muestran los elementos hidráulicos con su capacidad hidráulica seleccionados para soportar la fuerza de corte del RAM.

Tabla 5. BOM de elementos hidráulicos.

Item	Número de parte	Descripción	Especificación en psi
1	L2-1121-08	Cilindro Bloque Vektek	800-1000
2	21-0206-01	Cilindro Cartuchovektek	800-1000
3	21-1208-01	Cilindro Bloque Vektek	3500-5000
4	10-0706-10	Soporte Trabajo Vektek	3500-5000
5	10-0706-14	Soporte Trabajo Vektek	3500-5000
6	56-1013-00	Acoplamiento Vektek	3500-5000
7	56-1113-00	Boquilla Vektek	3500-5000

Como se observa en la Figura 5, los nidos son independientes de manera que el ajuste en el proceso no dependa uno del otro.

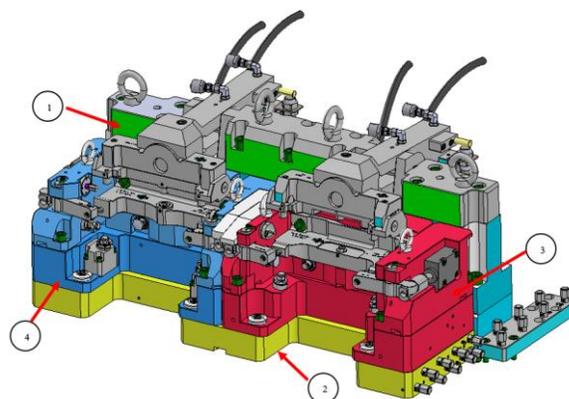


Figura 5. Elementos principales del dispositivo de sujeción.

En la Figura 6, 7 y 8 del modelo, se puede observar la ubicación de cada elemento hidráulico en el dispositivo de sujeción

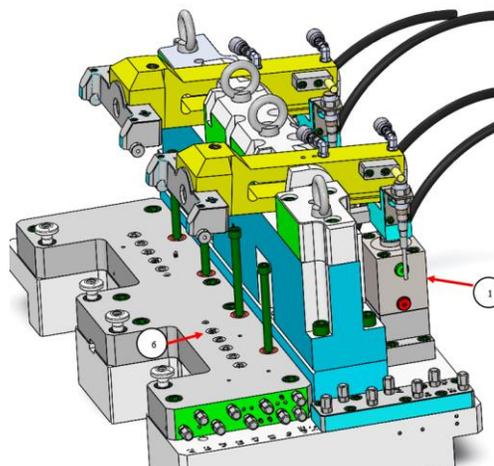


Figura 6. Elementos hidráulicos placa receptora.

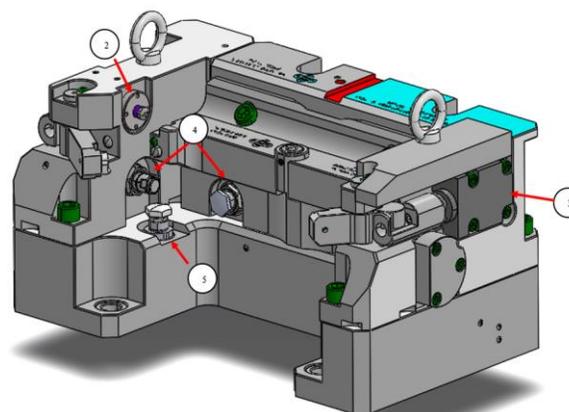


Figura 7. Elementos hidráulicos Nido LH - RH.

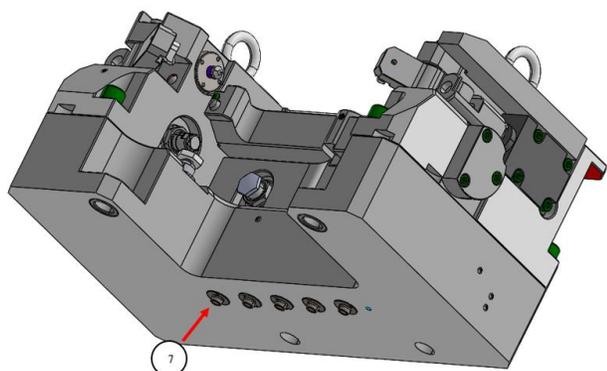


Figura 8. Elementos hidráulicos nido inferior.

Por otro lado, para el mecanismo de detección de pieza presente (*Air check*) se cuenta con un sistema “*pinhole*” en donde se activa o desactiva automáticamente el mecanismo eléctrico al que está conectado, cuando detecta o no, la presencia de un objeto dentro de un rango de acción determinado. Cada nido de sujeción está conectado a un presostato el cual fue regulado a la presión deseada para que se active el circuito. La presión seteada en los presostatos para la confirmación del circuito fue de 50 0/-5 bar. Es decir, el valor mínimo para la confirmación de del circuito es de 45 a +50 bar.

El principio básico de este componente es dejar que el fluido ejerza una determinada presión y cuando esta iguale a la presión del muelle se cerrarán los contactos del equipo. De la misma forma, cuando la presión caiga por debajo de la presión del muelle, entonces los contactos se abrirán [32].

En el dispositivo de sujeción, el sistema “*pinole*” se integró en la placa de referencia del Bracket, que es donde es colocada la pieza para que inicie la secuencia de sujeción antes de entrar la pieza a corte. Como se observa en la Figura 9, el desfogue de aire se encuentra en el datum Q, que es el primer punto de referencia que se debe asegurar en la secuencia de sujeción. Una vez sellado el flujo del aire con el pin deslizante de la placa de referencia (Figura 10), se confirma la

presión del flujo de aire en el presostato, y si está dentro de los parámetros seteados se inicia el ciclo de maquinado, en caso contrario, la máquina manda una señal de alarma en donde se confirma que la pieza no está posicionada correctamente en el dispositivo.

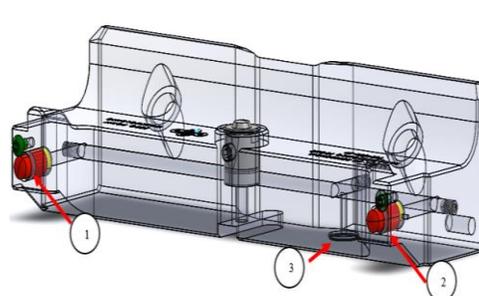


Figura 9. Sistema de detección de pieza en placa de referencia.

Descripción:

- 4. Datum Q1
- 5. Datum Q2
- 6. Entrada de aire en placa de referencia

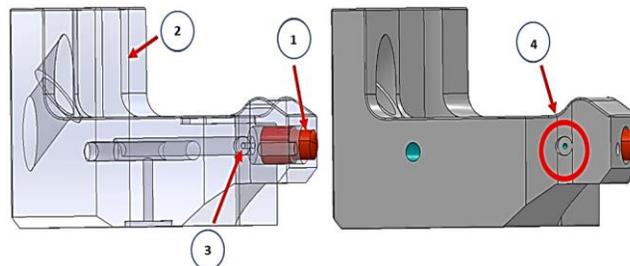


Figura 10. Descripción de funcionamiento para sistema de detección de pieza presente.

Descripción:

- 1. Perno deslizante
- 2. Placa de referencia
- 3. Desfogue de línea de aire
- 4. Confirmación de presión con perno deslizante en posición de referencia

2.2 Instrumentación

Para la instrumentación del dispositivo de sujeción hidráulica del proceso de brochado se optó por estructurar una secuencia de sujeción



en la máquina para detectar las diferencias de presión cuando el circuito está abierto o cerrado. Si la presión no se encuentra dentro de los límites establecidos, la máquina manda una alarma de “Dispositivo no apretado” e indica cuál de los dos nidos es el que no está siendo detectado.

En la Figura 12 se observa el circuito de presostatos conectados a la línea general de aire de la máquina, los cuales permiten hacer el Set up del flujo de aire e indican si el circuito alcanzó un valor que se encuentre dentro de límite inferior y límite superior seteado. Este valor se calcula en tiempo real en cada ciclo de maquinado y debe encontrarse dentro de los parámetros definidos en la etapa de diseño, 50 0/-5 bar para la confirmación del circuito.

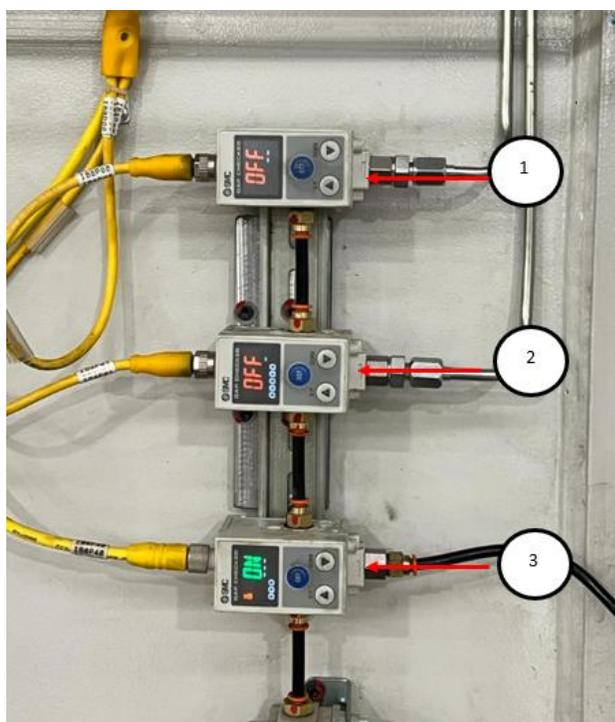


Figura 12. Configuración sensor de pieza presente.

Descripción:

1. Presostato nido izquierdo (LH)
2. Presostato nido derecho (RH)
3. Presostato mesa

En la Figura 13 se muestra el HMI con la confirmación de pieza presente para cada nido. Esto permite identificar en qué nido la pieza no se encuentra colocada correctamente en el nido antes de iniciar el ciclo de maquinado.

Verde: pieza colocada correctamente en dispositivo

Rojo: pieza colocada incorrectamente en dispositivo

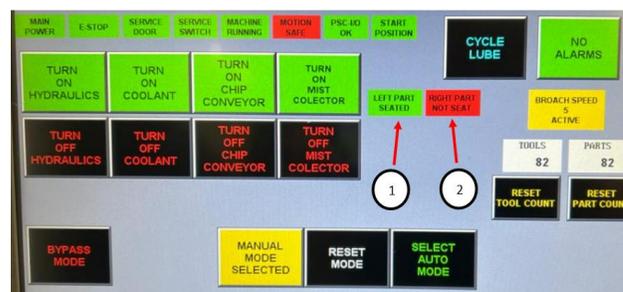


Figura 13. Botones de confirmación de pieza presente en HMI.

Descripción:

1. Botón de confirmación de sensor izquierdo (LH)
2. Botón de confirmación de sensor derecho (RH)

2.3.2 Instalación de herramental en máquina

Para instalar el dispositivo en la máquina se primero se instaló la placa receptora de nidos en la mesa móvil y se conectaron las líneas hidráulicas acorde a la secuencia de sujeción establecida para el sistema de sujeción. En la Tablas 8 y 9 se muestran las entradas y salidas definidas en el diagrama hidráulico para la sujeción y liberación de la pieza en ciclo automático.



Tabla 8. Circuito hidráulico de sujeción

Paso	Circuito	Función
1	A1	Avance Front Clamp
2	A2	Avance Centrador Izquierdo
3	A3	Avance Centrador Derecho
4	A4	Extender Clamp Superior
5	A5	Sujetar Clamp Superior
6	A6	Avance Work Support
7	A7	Sensado de pieza presente

Tabla 9. Circuito hidráulico de liberación de pieza

Paso	Circuito	Función
1	B6	Retraer Work Support
2	B5	Liberar Clamp Superior
3	B4	Retraer Clamp Superior
4	B3	Retraer Centrador Derecho
5	B2	Retraer Centrador Izquierdo
6	B1	Retraer Front Clamp

En la Figura 14 se muestra la placa montada en máquina y conectada.



Figura 14. Ensamble de placa receptora en máquina.

Finalmente, se realizó el montaje de los nidos independientes acorde a la posición definida en el diseño; Bracket trasero nido izquierdo (LH), Bracket delantero nido derecho (RH). Una vez montados los nidos en la máquina se colocaron los tornillos y *Speedloc* para fijarlos a la placa

receptora. En la Figura 15 se observa el montaje de los nidos independientes en la placa receptora.

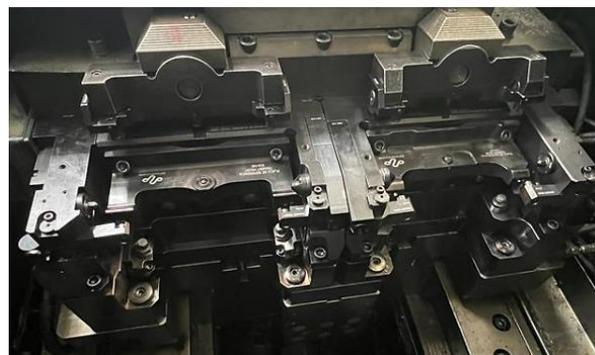


Figura 15. Montaje de nidos en placa receptora.

Para poder realizar un ciclo de maquinado con piezas de forja de Bracket, se verificó que la herramienta de corte no tuviera interferencias con el dispositivo de sujeción, posterior a eso se realizó el primer ciclo de maquinado sin ninguna interferencia de la pieza con el dispositivo de sujeción y la herramienta de corte. En la Figura 16 se muestra el primer ciclo de maquinado de forja de Bracket trasero y Bracket delantero.



Figura 16. Brochado de pieza izquierda y derecha.

La característica crítica del producto es el “*spam*” de brochado superior (Top) e inferior (Botton) en el Bracket. Pues en esta zona se coloca la balata, que en conjunto con el sistema hidráulico del automóvil, hace posible la función de frenado con el disco y el housing. Cualquier deformación que exista entre la parte superior e inferior del “*spam*” de brochado del Bracket puede generar ruido en el automóvil una vez que este se encuentra en marcha o desprendimiento



de balata que puede ocasionar una falla en el sistema de frenado.

En la Figura 17 se muestra la característica del “spam” superior e inferior en el Bracket después de maquinado.

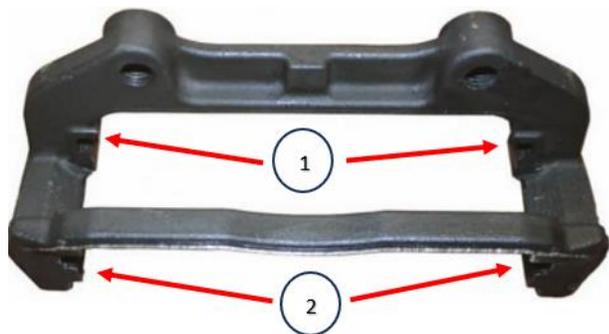


Figura 17. Spam de brochado Bracket [36].

Descripción:

1. Spam de brochado superior (Top)
2. Spam de brochado inferior (Bottom)

Debido a la criticidad de la característica se sometió el proceso a un estudio de capacidad (Cpk y Ppk) para determinar si la habilidad del proceso se encuentra o no bajo control en un periodo determinado, es decir, no hay puntos fuera de los límites de control del componente a lo largo del tiempo.

Los procesos tienen variables de salida, de las cuales deben cumplir con ciertas especificaciones a fin de considerar que el proceso está funcionando de manera satisfactoria. Evaluar la capacidad de proceso consiste en conocer la amplitud de la variación natural de éste para una característica de calidad dada, la cual permitirá saber en qué medida tal característica de calidad es satisfactoria [37].

Para evaluar la capacidad de proceso a corto y largo plazo se hace uso de los índices de capacidad Cpk y Ppk :

-El Cpk se utiliza para saber lo que el proceso es capaz de hacer en el futuro. Suponiendo que permanezca en un estado de control estadístico [38].

-El Ppk se utiliza para saber cómo se ha comportado el proceso en el pasado y no se usa para predecir el futuro como el Cpk , porque el proceso no está en un estado de control [38].

Para realizar el estudio de habilidad del proceso de maquinado con la integración del dispositivo de sujeción hidráulica, se tomaron las siguientes consideraciones:

1. La característica de “spam” de brochado debe encontrarse en el valor nominal de los límites de control.
2. Estudio corto de 5 piezas / nido para evaluar el comportamiento del proceso
3. Una vez aprobado el estudio corto, se realiza corrida de validación (125 piezas / nido para realizar el estudio de habilidad de proceso)
4. El estudio debe ser realizado sin interrupciones al proceso.
5. El Cpk obtenido no debe ser menor a 1.67. Esto como parte de los requerimientos específicos de cliente.

3. Resultados y discusión

A lo largo del desarrollo del dispositivo de sujeción se hicieron cálculos y simulaciones sobre elementos del dispositivo, tal es el caso de la fuerza de corte, los puntos de fijación, las restricciones del modelo, y el correcto funcionamiento para evaluar la deformación de la pieza al ejercer la fuerza de corte.

Así que, se realizó una simulación en software calculando los valores correspondientes para medir la deformación del Bracket cuando es maquinado con las restricciones definidas para el herramienta.



En la Figura 18 y se muestran las restricciones del modelo para la sujeción del Bracket y en la Tabla 10 se muestra la capacidad de fuerza para los elementos hidráulicos empleados en el dispositivo de sujeción.

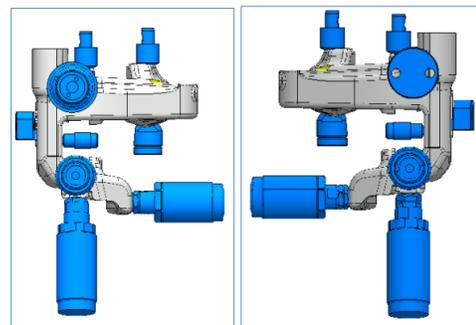


Figura 18. Restricciones del modelo.

Tabla 10. Capacidad de fuerza de cilindros hidráulicos.

Descripción	Cilindro hidraulico	Presión de entrada (Max) PSI	Fuerza Max (LBF)	Presión regulada (PSI)	Fuerza obtenida (LBF)
Cilindro de bloque (Clamp superior)	L2-1121-08	1015	1236	1000	1217.73799
Cilindro de bloque (Clams laterales)	21-1208-01	5000	2200	1000	440
Cilindro de jalón/empuje (Cilindro centrador)	21-0206-01	5000	1500	1000	300

Cabe mencionar que la máxima fuerza de corte del RAM es de 160 kN, por lo que se decidió aplicar la misma fuerza en la simulación, con el fin de analizar los elementos del dispositivo en condiciones extremas. En la Tabla 11 se muestra las cargas y sujeciones a las que se sometió el modelo.

Tabla 11. Cargas y sujeciones del modelo.

Nombre de carga	Cargar imagen	Detalles de carga
Fuerza1_CLAMP SUPERIOR		Entidades: 3 cara(s) Tipo: Aplicar fuerza normal Valor: 1,236 lbf
Fuerza2_CLAMP CENTRADOR		Entidades: 1 cara(s) Tipo: Aplicar fuerza normal Valor: 1,500 lbf
Fuerza3_CLAMPS TRASEROS		Entidades: 2 cara(s) Tipo: Aplicar fuerza normal Valor: 2,200 lbf
Fuerza4_FUERZA DE CORTE		Entidades: 24 cara(s) Referencia: Arista: 1 > Tipo: Aplicar fuerza Valores: ..., ..., 160,000 N

Como se observa en la Figura 19, el factor de seguridad (FDS) [39] en las áreas en donde es sometido el Bracket a tensión es mayor a 1.0, por

lo tanto, esto nos indica que el material que se encuentra en esa ubicación es seguro y no comenzará a fallar.

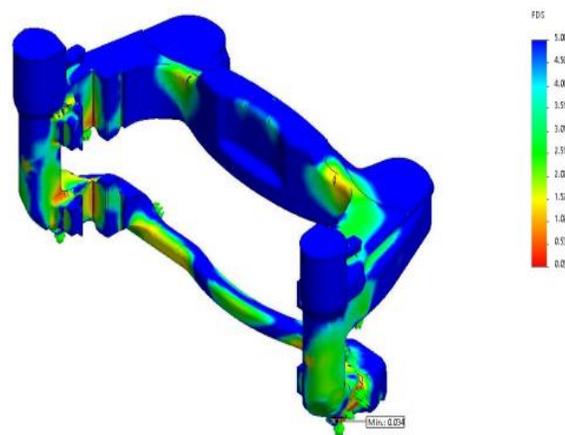


Figura 19. FDS del Bracket a 160 kN.

De igual manera se hizo la simulación con la fuerza de corte que actualmente es empleada en el proceso de brochado, que es de 50kN. En la Tabla 12 se muestra las cargas y sujeciones a las que se sometió el modelo.



Tabla 12. Cargas y sujeciones del modelo ajustadas.

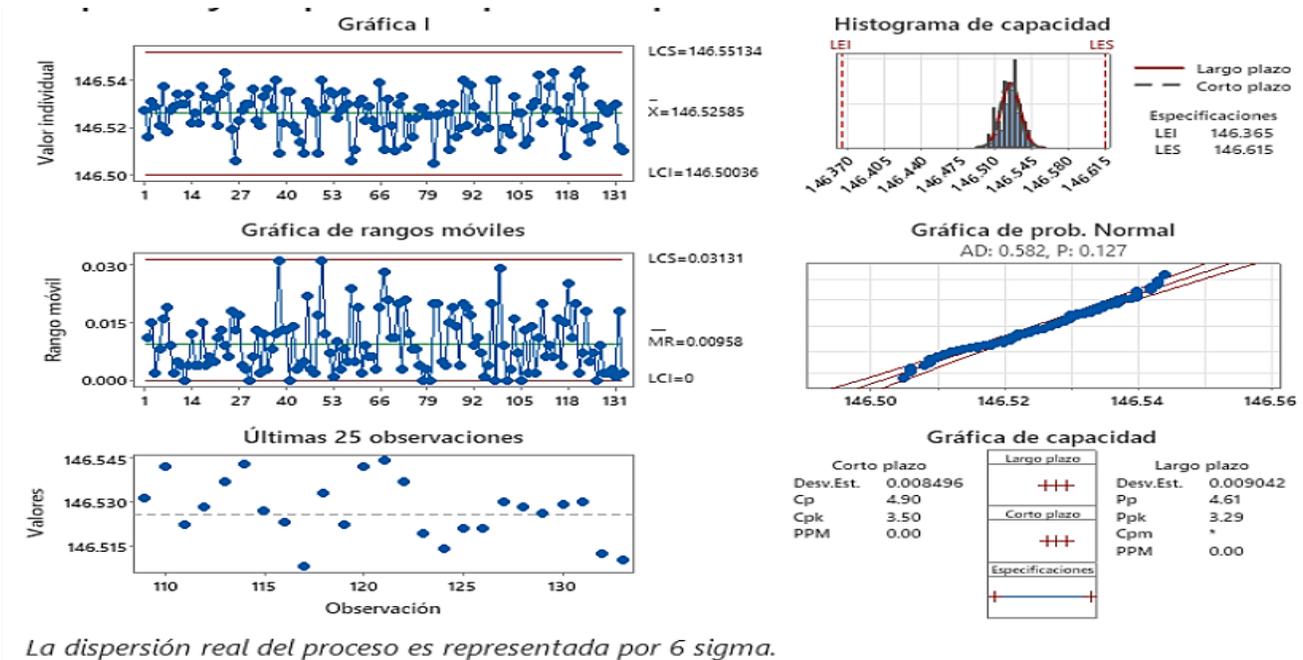
Nombre de carga	Cargar imagen	Detalles de carga
Fuerza1_CLAM P SUPERIOR		Entidades: 3 cara(s) Tipo: Aplicar fuerza normal Valor: 1,236 lbf
Fuerza2_CLAM P CENTRADOR		Entidades: 1 cara(s) Tipo: Aplicar fuerza normal Valor: 300 lbf
Fuerza3_CLAM PS TRASEROS		Entidades: 2 cara(s) Tipo: Aplicar fuerza normal Valor: 440 lbf
Fuerza4_FUERZA DE CORTE		Entidades: 24 cara(s) Referencia: Arista- 1 > Tipo: Aplicar fuerza Valores: ---, ---, 50,000 N

Como se observa en la Figura 20, el factor de seguridad (*FDS*) en las áreas en donde es sometido el Bracket a tensión es mayor a 3.0, por lo tanto, esto nos indica que el material que se encuentra en esa ubicación es seguro y no comenzará a fallar.



Figura 20. FDS del Bracket a 50 kN.

Para hacer el estudio de habilidad de proceso se hizo la medición de 125 piezas por nido, durante un ciclo de producción continuo. Una vez obtenidas las mediciones, los resultados fueron capturados en “Minitab” [40] para hacer el estudio de habilidad de proceso *Cpk* y *Ppk*. En las Figuras 21 y 22 se muestran los resultados del estudio de habilidad obtenidos para el freno delantero y freno trasero.



La dispersión real del proceso es representada por 6 sigma.

Figura 21. Estudio de habilidad *Cpk* y *Ppk* para freno trasero

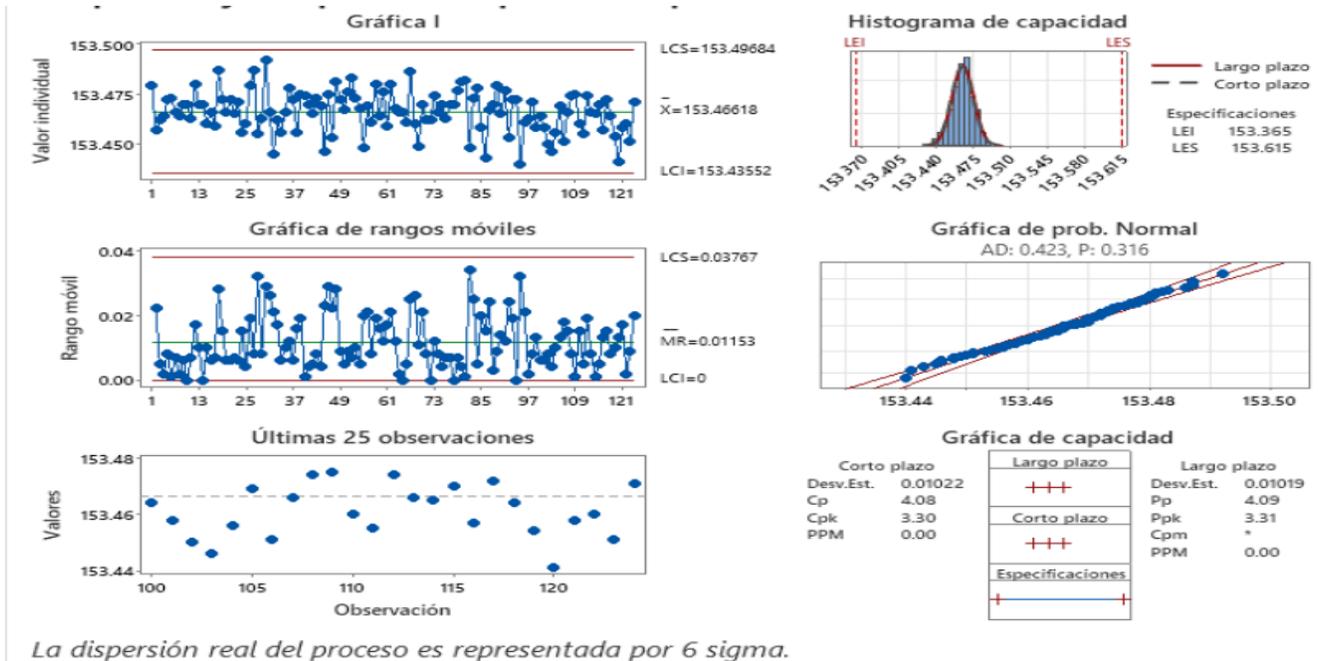


Figura 22. Estudio de habilidad Cpk y Ppk para freno delantero.

Del análisis podemos interpretar los siguiente:

- 1.- La dispersión de los datos se encuentra en la media de tendencia central.
- 2.- En las observaciones de los datos no nos indica la existencia de un patrón para los 125 datos. Esto nos llevan a sospechar que no hay independencia entre los datos
- 3.- En los gráficos de normalidad se aprecian que los 125 datos para cada modelo (delantero y trasero) se comportan de una manera normal. No se observan desviaciones que nos indican la falta de ajuste de normalidad.

De la misma manera los resultados obtenidos de habilidad de proceso (*Cpk*) para el freno trasero y delantero es de 3.5 y 3.3, respectivamente. Esto nos indica que el proceso de maquinado es confiable con los parámetros y restricciones seteados durante la etapa de validación.

4. Conclusiones

4.1 Principales resultados

Se diseñó y fabricó un dispositivo de sujeción hidráulica para el proceso de brochado de Brackets haciendo uso de procesos de manufactura e implementación de *Solidworks* para el modelado CAD. Se desarrollaron los elementos mecánicos y estructurales necesarios, como lo son la placa receptora de nidos y los nidos independientes. De igual manera, se hizo uso de tecnologías empleadas actualmente en el mercado, como lo son los cilindros hidráulicos, presostatos y sensores. Se realizó una propuesta funcional para detección de pieza presente en el herramienta que sirviera como un dispositivo a prueba de error.

Se seleccionó el material adecuado para los puntos de contacto entre la pieza y el dispositivo, esto con la finalidad de evitar el desgaste excesivo y dar mayor durabilidad. Así mismo, se seleccionó el material para los componentes que



no son sometidos a un desgaste excesivo pero que requieren tener ciertas propiedades para garantizar la estructura del mecanismo.

Es importante resaltar los beneficios obtenidos del uso de estas tecnologías empleadas en el sector industrial. Pues con la integración de un sistema de sujeción hidráulica al proceso de brochado fue posible mitigar la deformación de la pieza durante el proceso de corte, esto permitió garantizar la condición estructural de la pieza después del maquinado.

Adicional el uso de herramientas como el CAD permitieron hacer una estimación de parámetros de corte ideales para garantizar la geometría de la pieza luego de ser maquinada. Esto a través de un análisis de elemento finito en donde el modelo del dispositivo fue sometido a condiciones extremas y medias del proceso de maquinado para predecir como se comportaría la pieza (Bracket) ante los esfuerzos mecánicos del proceso.

Así mismo, fue posible mejorar el tiempo ciclo de producción de 17 seg/pza a 15 seg/pza. A una eficiencia del 75%, la producción por hora incrementó de 150 pzas/hr a 180 pzas/hr.

4.2 Alcances y limitaciones

Se evaluó el funcionamiento del dispositivo durante el proceso de brochado y la producción en serie, esto con la finalidad de asegurar la habilidad del proceso para mantener las características del producto dentro de control estadístico.

4.3 Trabajo futuro

Como trabajo futuro se tiene como objetivo replicar el concepto de dispositivo de sujeción en máquinas que realicen la misma operación, Esto permitirá incrementar la rentabilidad del negocio al mejorar el performance de producción.

Cabe mencionar que este concepto de dispositivo permitirá dar mayor flexibilidad a la operación, ya que reducirá el tiempo de paro por cambio de modelo, será posible ajustar la configuración de producción y permitirá reducir el costo de inversión para proyectos futuros.

5. Agradecimientos

Agradecemos al Centro de Investigación y Asistencia Técnica del Estado de Querétaro, A.C. (CIATEQ) y a la empresa donde fue desarrollado el proyecto por todas las facilidades otorgadas para la realización de dicho proyecto, de igual manera, agradecer por el apoyo brindado a todas las personas involucradas directa o indirectamente en el desarrollo de este trabajo.

6. Agradecimientos de autoría

Jorge Alberto Morales Martínez: Conceptualización; Metodología; Software; Análisis formal; Investigación; Adquisición de fondos; Recursos; Análisis de datos; Borrador original; Administración de proyecto, Revisión y edición. *Carlos Marín:* Conceptualización; Ideas; Análisis de datos; Software; Análisis formal y Supervisión. *Raúl Pérez Bustamante:* Revisión y edición.

Referencias

- [1] R. Y. Zhong, X. Xu, E. Klotz, and S. T. Newman, "Intelligent Manufacturing in the Context of Industry 4.0: A Review," *Engineering*, vol. 3, no. 5, pp. 616-630, Oct. 2017, <https://doi.org/10.1016/J.ENG.2017.05.015>
- [2] "La actividad industrial creció en 10 estados durante abril, destacó Tlaxcala | Gaceta económica | Gobierno | gov.mx." Accessed: Aug. 08, 2023. [Online]. Available: <https://www.gob.mx/shcp%7Cgacetaeconomica/articulos/la-actividad-industrial-crecio-en-10-estados-durante-abril-destaco-tlaxcala>
- [3] "Programa de modelado 3D | Versiones de prueba y tutoriales gratuitos | Autodesk." Accessed: Aug. 08, 2023.



- [Online]. Available: <https://www.autodesk.mx/solutions/3d-modeling-software>
- [4] J. García and M. Vilchis, "Análisis de Vulnerabilidades de las Mallas en los Modelos 3D," *Télématique*, vol. 11, pp. 73-88, Dec. 2022.
- [5] M. D. Díaz Alemán, "Modelado 3D de precisión en procesos de digitalización de escultura construida," *AusArt*, vol. 9, no. 2, pp. 113-125, Dec. 2021, <https://doi.org/10.1387/ausart.23077>
- [6] G. Booch, J. Rumbaugh, and I. Jacobson, *Unified Modeling Language User Guide, Second Edition*. Addison-Wesley, 2005.
- [7] S. S. Pachbhai and L. P. Raut, "Design and Development of Hydraulic Fixture for Machining Hydraulic Lift Housing," *Int. J. Mech. Eng. & Rob. Res.*, vol. 3, no. 3, 2014, Accessed: Aug. 08, 2023. [Online]. Available: www.ijmerr.com
- [8] O. Gonzalo et al., "A method to minimize the workpiece deformation using a concept of intelligent fixture," *Robot Comput Integr Manuf*, vol. 48, pp. 209-218, Dec. 2017, <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2017.04.005>
- [9] "Vektek LLC." Accessed: Aug. 08, 2023. [Online]. Available: <https://www.vektek.com/>
- [10] C. Rodríguez, *Diseño mecánico con Solidworks 2015*, Primera Edición. RA-MA Editorial, 2015.
- [11] J. A. Leach, S. Lockhart, and E. Tilleson, *AutoCAD 2020 Instructor, First Edition*. Missions, KS: SDC Publications, 2019.
- [12] F. Fulkerson, *Mastercam X9 - 2 1/2D, 3 Axis Mill Programming, First Edition*. Fred Fulkerson, 2015.
- [13] M. P. Groover, "Fundamentos de manufactura moderna: materiales, procesos y sistemas," vol. 1, W. Stenquist, Ed., Prentice Hall, 1997, pp. 619-620.
- [14] A. Barbosa, C. Mar, and J. Molar, "Manufactura Conceptos y Aplicaciones," Primera edición., vol. 1, Grupo Editorial Patria, 2019, pp. 225-230.
- [15] A. Barbosa, C. Mar, and J. Molar, "Manufactura Conceptos y Aplicaciones," Primera Edición., Grupo Editorial Patria, 2019, pp. 168-186.
- [16] C. M. Patel and G. D. Acharya, "Design and Manufacturing of 8 Cylinder Hydraulic Fixture for Boring Yoke on VMC - 1050," *Procedia Technology*, vol. 14, pp. 405-412, Jan. 2014, <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2014.08.052>
- [17] T. Seelbach, L. Beja, D. Schraknepper, and T. Bergs, "Modelling the Geometrical Accuracy for Different Part Geometries and Process Parameters when Broaching Fir-Tree Slots in Turbine Disks," *Procedia CIRP*, vol. 102, pp. 31-36, Jan. 2021, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.09.006>
- [18] F. Zanger, N. Boev, and V. Schulze, "Surface Quality after Broaching with Variable Cutting Thickness," *Procedia CIRP*, vol. 13, pp. 114-119, Jan. 2014, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.04.020>
- [19] F. Gómez, J. Vilar, and M. Tejero, *Seis Sigma*, Segunda edición. Madrid: Fundación Confemetal, 2003.
- [20] I. Ibañez, *Diseño de utillajes, matricería y prototipado con SolidWorks*, Primera Edición. Marcombo, 2021.
- [21] M. García, P. Sanz, J. De Benito, and J. Galindo, "Definición de una metodología para una aplicación práctica del SMED," *Técnica Industrial*, pp. 46-54, 2012.
- [22] R. Singh, "Liquid Hydrocarbon Pipeline Risk Management," *Pipeline Integrity Handbook*, pp. 95-125, 2017, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813045-2.00007-7>
- [23] L. M. Cerdá Filiu, "Instalaciones eléctricas y automatismos : Instalación y mantenimiento, Instalaciones frigoríficas y de climatización, Instalaciones de producción de calor," p. 274, 2014.
- [24] M. Turesson, "Dynamic simulation of check valve using CFD and evaluation of check valve model in RELAP5".
- [25] "Standard Locator - mPower." Accessed: Aug. 08, 2023. [Online]. Available: <https://mpower.com/fixturing-system/locator/standard-locator/>
- [26] "Vektek: Products: Hydraulic: Cylinders: Manifold Block." Accessed: Aug. 08, 2023. [Online]. Available: <https://www.vektek.com/Product.aspx?CategoryId=68>
- [27] "Vektek: Products: Hydraulic: Work Supports: High-Capacity Fluid Advance." Accessed: Aug. 08, 2023. [Online]. Available: <https://www.vektek.com/Product.aspx?CategoryId=483>



[28] E. Montijo, "La Investigación en Ingeniería," Primera Edición., Argentina: Autores de Argentina, 2020, pp. 16-17.

[29] J. Chaires, J. Segura, S. Serna, and A. Molina, "Evaluación de propiedades mecánicas de dos aceros grado herramienta AISI-O1, AISID2 y obtención de la concentración de esfuerzos en la geometría de mordazas de sujeción de especímenes compactos de tensión," Superficies y Vacío, vol. 23, pp. 10-14, Aug. 2010.

[30] J. Bahadur. Singh, "Alloy 625: microstructure, properties and performance," 2022.

[31] W. Pinzón and G. Ramos, "Análisis de las propiedades mecánicas de tensión, tenacidad y dureza de un acero SAE 1045 mediante los procesos de tratamiento térmico de temple, criogenia y revenido," Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, 2016.

[32] L. Cerdá, "Instalaciones eléctricas y automatismos," Primera Edición., Madrid: Ediciones Paraninfo, S.A, 2014, p. 277.

[33] L. Corona, G. Abarca, and J. Mares, "Sensores y Actuadores," Segunda Edición., México: Grupo Editorial Patria, 2019, pp. 166-167.

[34] John. Hyde, J. Regué, and A. Cuspinera, "Control neumático y electroneumático," 1997.

[35] J. Rodríguez, L. Cerdá, and R. Sánchez, "Automatismos Industriales," Primera Edición., Madrid: Ediciones Paraninfo, S.A., 2014, pp. 339-340.

[36] J. Hinds, "GM G-Body," 1st ed., North Branch: Car Tech books, 2013, p. 35.

[37] H. Gutiérrez and R. de la Vara, Control Estadístico De Calidad Y Seis Sigma, Segunda edición. México, D.F.: McGraw-Hill/Interamericana Editores, S.A. de C.V., 2009.

[38] M. A. Martínez and J. Morales, "Lean Seis Sigma para la Mejora de Proceso," Primera Edición., Universidad Miguel Hernández de Elche, 2022, pp. 100-102.

[39] D. Fuentes, A. Salinas, and D. De la Torre, "Aplicacion de Herramientas de Simulación y Análisis para Diseño de un Robot Manipulador de Dos Grados de Libertad con Configuración Manual del Espacio de Trabajo," Pistas Educativas , vol. 41, pp. 185-202, 2019.

[40] S. A. Lesik, "Applied Statistical Inference with Minitab," Second Edition., Boca Raton: Taylor & Francis Group, LLC, 2019.
<https://doi.org/10.1201/9780429444951>

Derechos de Autor (c) 2023 Jorge Alberto Morales Martínez, Carlos Alberto Marin Álvarez, Raúl Pérez Bustamante



Este texto está protegido por una licencia [Creative Commons 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Usted es libre para compartir —copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato— y adaptar el documento —remezclar, transformar y crear a partir del material— para cualquier propósito, incluso para fines comerciales, siempre que cumpla la condición de:

Atribución: Usted debe dar crédito a la obra original de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del licenciante o lo recibe por el uso que hace de la obra.

[Resumen de licencia](#) - [Texto completo de la licencia](#)