

Automatización del Proceso de Embutido Profundo/Semi-profundo

Álvarez Zapata L. A., Sandoval Pineda J. M. y Flores Herrera L. A.

Sección de Estudios de Posgrado e Investigación, ESIME-UA-IPN. Av. de las Granjas No. 682 Col. Sta. Catarina Delegación
Azcapotzalco-México D.F. Tel.: 5729-6000, Ext.: 64530. alvarez0800@ipn.mx

Resumen

Se diseña una máquina alimentadora de cospeles, la cual satisface la necesidad de automatizar el proceso de embutido a un bajo costo. La máquina se encarga de seleccionar y dosificar la materia prima –cospeles– en una prensa o troqueladora que puede ser de diversas capacidades. La máquina alimentadora se elabora partiendo de la necesidad por obtener un incremento en la producción de sellos de monoblock para automóviles, mejorar la calidad de los productos finales y proteger la integridad física de los operadores de troqueladora. Con el apoyo de software de diseño y simulación, el costo final de la máquina alimentadora automática de cospeles se reduce de manera significativa, muy por debajo de los costos actuales de máquinas que desarrollan una función similar, lo cual la hace muy atractiva para el sector de las Pymes que se encargan de la producción de piezas embutidas y no cuentan con altos recursos de capital para obtener equipo de alto costo monetario que les permita hacer más eficientes sus procesos de producción.

Palabras Clave: automatización, vibrador electromagnético, selección de piezas, aumento de producción, sistema de control, seguridad.

1. Introducción

La industria manufacturera metal-mecánica en general, se encuentra en constante evolución e innovación debido a la gran demanda actual de productos y a su continuo crecimiento. Los procesos de manufactura sufren radicales cambios en cuanto a su manera de fabricar productos. Hace algunas décadas la intervención de la mano del hombre para la fabricación de piezas era fundamental, actualmente sólo se requiere de un par de operadores y varias máquinas para elaborar un sinnúmero de productos [1]. Estos procesos que cuentan con un alto grado de automatización, permiten obtener productos de mejor calidad a menor costo y ofrecen mayor seguridad a los operadores.

De los procesos de manufactura, el proceso de embutido o embutido profundo/semiprofundo, es uno de los que mayores riesgos presentan para el operador, debido a que se necesita operar la materia prima de forma manual y colocarla en una máquina llamada prensa o troqueladora.

2. Antecedentes generales y mercado actual

Actualmente existe maquinaria con el herramental adecuado para llevar a cabo el proceso de troquelado, mediante la integración de elementos como dados progresivos, actuadores neumáticos, el uso de P.L.C. y sensores eléctricos entre otros, el proceso se lleva a cabo de forma autónoma y garantizando la calidad del producto, la desventaja es el costo, que es en promedio de \$65 mil dólares, lo cual hace que este fuera del alcance de las Pymes dedicadas al proceso de troquelado. De esta forma surge la inminente necesidad de automatizar este proceso, el cual debe ser costeable para la Pymes, eficiente y seguro.

Otro factor importante en este proceso de manufactura, es que durante una jornada laboral de 8 horas, un operador de troqueladora puede llegar a colocar hasta 10,000 piezas, de las cuales un porcentaje aproximado del 17% son colocadas de forma incorrecta en la matriz del troquel, esto debido en gran medida a que es una tarea inmensamente repetitiva. Estas piezas colocadas erróneamente tienden a causar degeneración en el herramental y un producto con calidad inferior.

3. Necesidades

Automatizar el proceso de embutido profundo, enfocándose en el sector de las pequeñas y medianas empresas del área metal-mecánica.

4. Objetivo de diseño

Se diseña una máquina que selecciona correctamente la materia prima y posiciona de forma automática los cortes de lámina de cualquier

geometría, de espesor no mayor a calibre catorce. La máquina es utilizada para el proceso de embutido profundo/semiprofundo.

Para facilitar el diseño de la máquina alimentadora, el objetivo de diseño se ha desglosado en seis objetivos particulares, los cuales se enfocan específicamente en satisfacer cada necesidad requerida de forma individual, y al final obtener un diseño funcional. Los objetivos particulares son: 1. Lograr un aumento en la producción de piezas embutidas y reducir costos de operación; 2. Mejorar la calidad de los productos elaborados; 3. Disminuir accidentes relacionados con la operación del proceso de troquelado; 4. Obtener un control confiable de la producción llevada a cabo por cada máquina durante el proceso; 5. Desarrollo de una interface máquina-ordenador, la cual posea un entorno gráfico amable, y sea de fácil interpretación para el operador, el inspector de calidad y supervisores de producción; 6. Fácil funcionamiento y mantenimiento.

5. Diseño del Alimentador

Partiendo de un estudio completo de los procesos de producción actuales y otros desarrollados con anterioridad, se elabora un diseño en 3D, del cual posteriormente se analizará y simulará usando software computacional y de esta manera obtener los resultados óptimos con el mínimo de errores, evitando gastos extras ocasionados por una reingeniería en la manufactura del producto final. El diseño del alimentador consta de las siguientes etapas: 1. Preparación de la materia prima, 2. Ordenamiento y selección de materia prima, 3. Alimentación y dosificación de materia prima, 4. Colocación de materia prima en matriz de troquel, y 5. Etapa de control del sistema y adquisición de datos.

5.1. Preparación de la materia prima

Uno de los pasos más importantes antes de realizar cualquier proceso, es el recibo e inspección de materia prima. En este caso para realizar los sellos de monoblock, se usa lámina de diversos materiales como, acero inoxidable T-304 y T-401, latón SAE 70-A, acero SAE 1010 y 1045, acero aluminizado, etc., las cuales se trabajan en diversos calibres (del 22 al 14). La materia prima deberá estar libre de defectos como ralladuras y abolladuras, además el espesor tendrá que ser lo más homogéneo posible en todo lo largo de la lámina, esto se realiza mediante inspecciones visuales e inspecciones de metrología dimensional – con el apoyo de micrómetro y vernier–, se acepta o

rechaza la materia prima. Cualquier imperfección en la lámina se verá reflejada en el producto final.

Una vez realizada la aceptación de la materia prima, ésta es llevada a un proceso de corte, haciendo uso de la máquina cizalladora la lámina es cortada en tiras, estas tiras de lámina cuentan con el ancho correspondiente de cada cospel a fabricar. Efectuando los cálculos correspondientes se determina el ancho de la lámina, en este caso para el diseño y uso del alimentador las dimensiones con las que se trabajan son con anchuras no mayores de 100 mm y no menores a 25 mm. Ya con las tiras de lámina cortadas, están pasan a otro proceso, el cual consiste en troquelar las tiras con un punzón de corte, con el cual se obtendrán los futuros cospeles a embutir, de la misma forma, estos dados o punzones de corte cuentan con las medidas correspondientes de cada tapón a fabricar. Los dados de corte, al igual que los de embutido, deben de contar con el proceso de templado correspondiente, conforme al producto que van a fabricar, para así operar durante largos ciclos sin dañarse. Un dado de corte mal maquinado-conformado, en un corto o mediano plazo generará una orilla con filo pronunciado en los cospeles obtenidos, a lo que comúnmente se le llama *rebaba*. En la **Figura 1** se observa un cospel obtenido de una lámina de acero inoxidable T-304, en la cual se observa en el contorno del mismo, la *rebaba* generada en el proceso de corte, en donde el dado de corte no cuenta con las propiedades de corte apropiadas, tales como el filo de corte entre otras. Por otra parte en la **Figura 2** se ilustra un cospel obtenido de una lámina de acero SAE 1010, en donde se aprecia un borde sin imperfecciones. Los cospeles obtenidos se convertirán en la materia prima del proceso de embutido, en el cual se obtendrán los sellos o tapones con la profundidad deseada.



Fig. 1. Cospel de acero inoxidable con filo o rebaba en su perímetro.

5.2. Ordenamiento y selección de la materia prima.

A partir de esta etapa en adelante se comienza con el diseño del alimentador automático. Para iniciar con el diseño, se analizan las piezas que se deben seleccionar y desplazar. Estudiando diversos sistemas de selección de piezas para

ensamble existentes, se adecua uno para esta aplicación. Para ello en la **Figura 3** se ilustran algunos sistemas de selección [2]. Esta etapa es una mayor importancia, ya que se realiza la selección, acomodo y alimentación de cospeles al resto de la máquina, así como también es la etapa donde se controla la detención y avance de cospeles.



Fig. 2. Cospel de acero SAE 1010 sin bordes imperfectos.

Como se sabe, los cospeles obtenidos tienen un ligero filo o rebaba en el mejor de los casos, recordando que lo ideal es no tener rebaba en el cospel. Usando este dato, se diseña un selector de piezas en donde se identifican los cospeles que tienen rebaba de los que no la tienen. El funcionamiento de este selector de piezas es el siguiente, los cospeles son colocados en un tazón, el cual está montado sobre un vibrador electromagnético, al comenzar a vibrar el tazón los cospeles comienzan a ser desplazados en el interior del mismo tazón y estos son *guiados* por medio de un canal en forma de espiral.

En la **Figura 4** se observa el diseño final del tazón, en la cual se aprecian los canales que guían el paso de los cospeles. El recorrido de los cospeles se realiza de la parte inferior hacia la parte superior del tazón. Para un funcionamiento óptimo dentro del tazón se coloca hasta un límite de 75 kilogramos de cospeles, esto debido a que el vibrador podría no generar la suficiente vibración para desplazar a una velocidad adecuada los cospeles, incrementando su corriente y generando un calentamiento excesivo en la bobina.

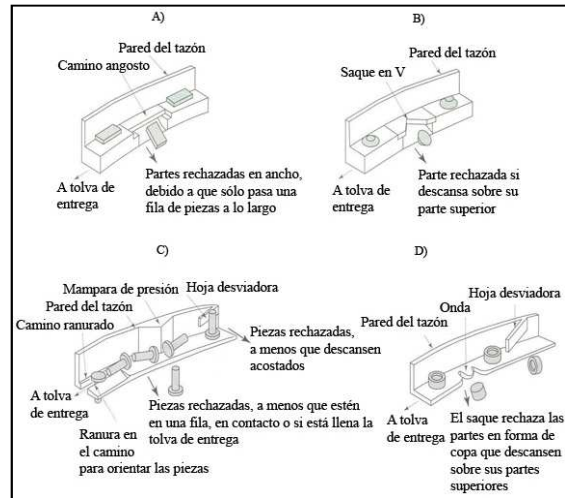


Fig. 3. Sistemas de selección de piezas con distintas geometrías [2].



Fig. 4. Tazón contenedor de cospeles.

Para hacer el traslado de las piezas dentro del tazón, se implementa un sistema de vibración, el cual está integrado por una bobina que se instala debajo del tazón. El vibrador electromagnético se constituye por diversos elementos; componentes eléctricos como un variador de frecuencia y bobina, y elementos estructurales como un marco y sistema de amortiguación. Con el variador se excita la bobina a diversas frecuencias, que se traducen en *vibraciones* más largas o más cortas y con esto se regula la velocidad de avance de los cospeles. En la **Figura 5** se observa el diagrama de las conexiones correspondientes a la bobina. En la **Figura 6** se ilustra el montaje del vibrador electromagnético, en la cual se observa la lámina que protege la bobina, la base de la bobina está instalada sobre una placa de acero de 2 pulgadas de grosor, la cual proporciona estabilidad al vibrador. Para montar el vibrador se ha instalado un arreglo de resortes de acero estructural, con los cuales se evita que la vibración se transmita a la estructura principal. Sobre la bobina se coloca el tazón, donde son vertidos los cospeles. El vibrador electromagnético funciona con corriente alterna a 127 Volts y 50/60Hz. Con todo lo descrito anteriormente, las

piezas son seleccionadas de forma correcta y alimentadas con una velocidad que es regulable.

5.3. Alimentación y dosificación de materia prima.

Las piezas provenientes del tazón contenedor son alimentadas de una en una a un primer dispositivo alimentador, el cual tiene como función alinear los cospeles y así se evitan atascos de materia prima. Este primer alimentador cuenta con un pistón neumático de doble efecto, el cual se encarga de cambiar la posición del cospel.

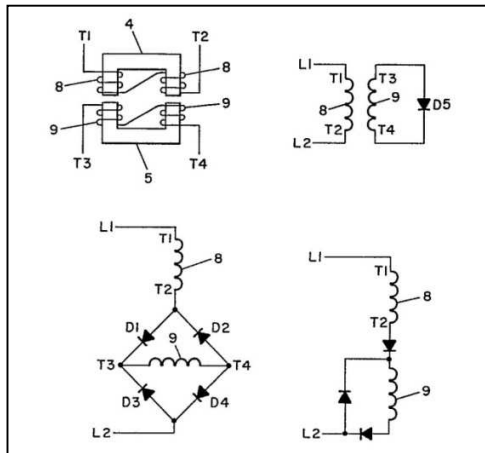


Fig. 5. Conexiones correspondientes al sistema de vibración.



Fig. 6. Vibrador electromagnético.

El pistón de doble efecto cuenta con válvulas reguladoras de caudal en la entrada y salida de aire, los cuales permiten regular la velocidad de avance y retroceso del émbolo. Una vez que el pistón empuja cada cospel, estos cambian su posición 90° para así posteriormente incorporarse a una rampa, cuya función es realizar el cambio de la posición de las piezas en otros 90° aproximadamente, lo que es atribuible a la geometría de la rampa. Un sensor de tipo inductivo

montado al principio del alimentador detecta el paso de las piezas, en el momento que se presente una saturación de cospeles, envía la señal al P.L.C. y este a su vez al vibrador, lo que genera que se detenga el abasto de piezas.

En la **Figura 7** se observa el diseño de este primer alimentador, así como el proceso correspondiente para voltear cada cospel. En la parte inferior de este primer alimentador se instaló una lámina que tiene forma de V, con la cual los cospeles son guiados al segundo alimentador. Ésta pieza es para conectar o acoplar al primer alimentador con el segundo alimentador y de esta forma asegurar la correcta caída de cospeles.

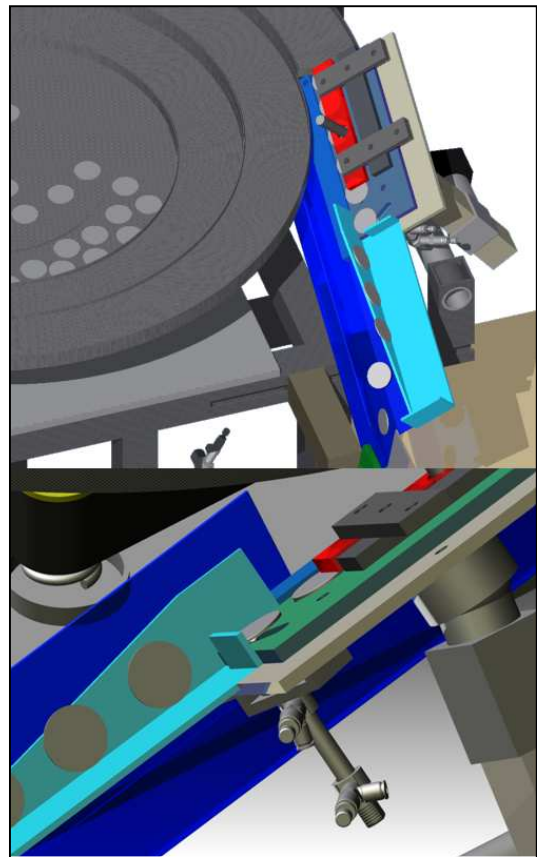


Fig. 7. Primer alimentador de piezas.

El segundo alimentador de piezas, consta de tres sensores inductivos, los cuales realizan la detección de piezas en el alimentador además de enviar la señal a los pistones neumáticos dosificadores de cospeles instalados en la parte inferior del segundo alimentador. Los cospeles provenientes del primer alimentador se van alojando en el fondo de este segundo alimentador, uno tras otro se van juntando hasta alcanzar un nivel óptimo, alcanzado este nivel se comienza con la dosificación

de cospeles a la matriz del troquel. Los sensores inductivos; de abajo hacia arriba, el primer sensor sirve para detectar materia prima en el alimentador, el segundo sensor (altura ajustable) determina el nivel óptimo de materia prima, y el tercer sensor (también de altura ajustable) determina si el alimentador ha alcanzado un nivel máximo de cospeles. En la **Figura 8** se observa el segundo alimentador de piezas, así como los pistones dosificadores.

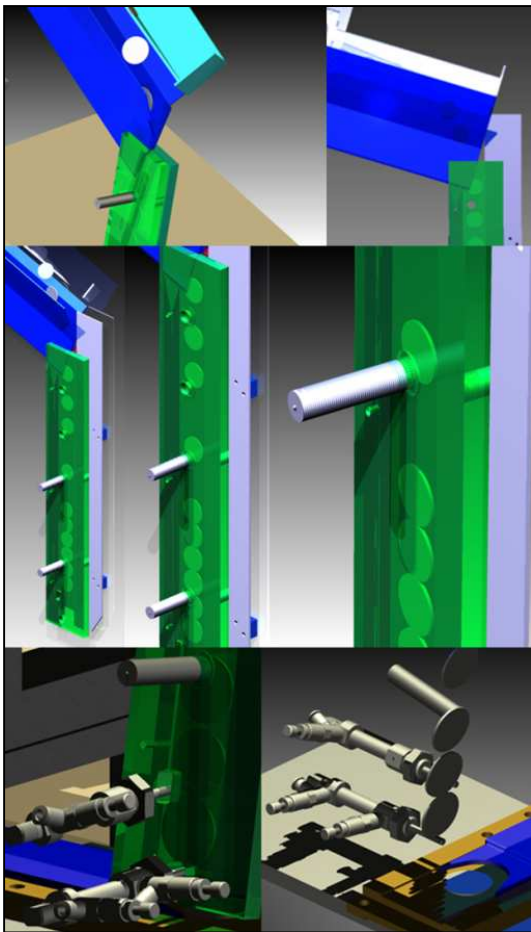


Fig. 8. Segundo alimentador de piezas con pistones neumáticos dosificadores.

El segundo alimentador de cospeles cuenta con dos pistones neumáticos, uno de doble efecto y otro de simple efecto. De arriba hacia abajo, el primer pistón es de simple efecto, su función es retener los cospeles almacenados en el segundo alimentador mientras el cospel inmediato inferior es dosificado a la matriz. Una vez que se ha dosificado el cospel, el pistón de simple efecto retrae su émbolo y deja caer los cospeles que habían sido retenidos. El segundo pistón es un pistón de doble efecto, con el cual es dosificado el cospel a la matriz, este pistón se energiza una vez que se ha

alcanzado el nivel óptimo de materia prima en el segundo alimentador y el pistón de simple efecto ha atorado los cospeles superiores y es entonces cuando el pistón de doble efecto libera el último cospel y cae a la corredera donde después es colocado en la matriz del troquel. Una vez colocado el cospel en la corredera final, el ciclo de dosificación de cospeles se vuelve a repetir hasta finalizar con el último cospel. El segundo alimentador cuenta con un sistema que permite ajustar su ancho en función del diámetro del cospel con que se trabaje, de la misma forma los sensores inductivos también son ajustables dependiendo del diámetro del cospel.

5.4. Colocación de materia prima en matriz de troquel.

Esta es la etapa final del proceso, y consiste en realizar el debido desplazamiento de las piezas dosificadas por el segundo alimentador a la matriz del troquel. Para ello se dispone de una deslizadera, la cual es manipulada por un pistón neumático de doble efecto, esta deslizadera es de carrera ajustable a través del pistón, su adaptación a la matriz del troquel es muy versátil, ya que no es necesario un medio especial para realizar el acoplamiento a la troqueladora, únicamente se orienta de manera horizontal a la base y con la matriz del troquel. El acoplamiento de la deslizadera a la troqueladora se observa en la **Figura 9**, la cual muestra que los postes guías del troquel y la matriz no se han modificado, así no existe la necesidad de alterar el herramental para realizar el acoplamiento.

En caso de requerir algún tipo de lubricante para los cospeles, se realiza usando aspersores de propósito especial, todo en función del tipo de lubricante a usar, el cual es rociado en cantidades controladas sobre la base de la guía de la corredera y de esta forma se lubrica la pieza.

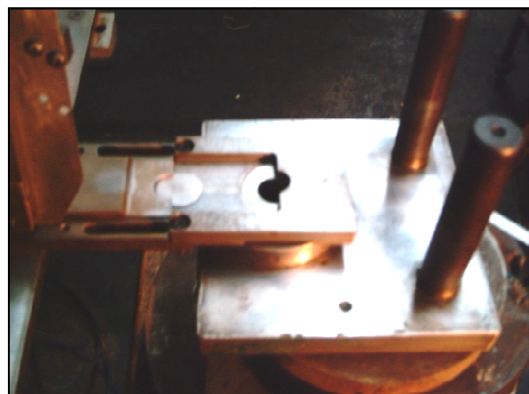


Fig. 9. Acoplamiento matriz-deslizadera.

5.5. Etapa de control del sistema y adquisición de datos.

La etapa de control del alimentador automático es llevada a cabo por un P.L.C. de uso industrial moderado de la marca SMC, con el cual es desarrollado el programa que coordina toda la etapa de mando, así como la etapa neumática, y de la misma forma el uso de este P.L.C. provee una interfaz muy dinámica con el equipo ordenador, y haciendo uso de los accesorios compatibles del P.L.C., se desarrolla una interfaz de usuario (GUI) de fácil acceso usando el programa LabView (NI). La máquina alimentadora automática cuenta con un gabinete de control montado a un costado de la estructura principal, en el cual se instala el gabinete donde se aloja el P.L.C., el variador de frecuencia de la bobina, la electroválvula, las conexiones correspondientes de alimentación, así como la interfaz para adquisición de datos, esto último de forma interna. Externamente el gabinete del P.L.C. cuenta con su unidad de mantenimiento para la preparación de aire para los pistones, todo de la marca SMC. En la **Figura 10** se observa el diseño básico del gabinete de control y sus dispositivos correspondientes.

6. Estructura y actuadores neumáticos

La estructura está diseñada y elaborada con perfil tubular rectangular, de 38.1 mm de cada lado y con un espesor de 3 mm. Éste perfil cuenta con excelentes prestaciones mecánicas, además es de bajo costo. Sus propiedades mecánicas son [3]:

- Acero de bajo carbono
- Esfuerzo de tensión: 3160 kg/cm^2
- Esfuerzo de fluencia: 2740 kg/cm^2
- Elongación en 50 mm: 21%

Por otra parte, los cilindros neumáticos son seleccionados en función de la fuerza necesaria y de la presión de trabajo. Para hacer esto, se deberán aplicar diversos criterios, tales como la fuerza de pandeo admisible del vástago y el consumo del aire [4]. Con los valores que se indican en tablas, los cilindros alcanzan velocidades que, en la mayoría de los casos, son suficientes para las aplicaciones normales. Sin embargo, para un cálculo más exacto, debe tomarse en cuenta lo siguiente: en neumática se trabaja con la energía almacenada por la presión y el caudal de un fluido. Se seleccionan pistones en base a la tarea a realizar y las características de las piezas a desplazar, debido a que el peso de los cospeles es casi despreciable (1.6 grs), se hace la selección en base del diámetro del vástago y la

carrera máxima permisible, además los pistones seleccionados operan con una presión admisible de 3 a 6 bar. Para obtener la velocidad de los pistones, se parte de la selección de ellos, usando la distancia a recorrer en un tiempo determinado. Se obtiene la siguiente la velocidad:

$$v = \frac{24 \text{ mm}}{0.75 \text{ s}} = 32 \text{ mm/s} \quad (1)$$

Donde; 24 mm es la distancia o carrera del pistón de entrada más la de salida; 0.75 s es el tiempo en que se debe cubrir la distancia. Con la velocidad obtenida se alimentan aproximadamente 1.5 piezas por segundo. Para obtener esta velocidad se debe calcular el flujo volumétrico Q que se necesita en la entrada y salida de los actuadores neumáticos. Partiendo de la Ecuación (2) se obtienen los flujos correspondientes.

$$Q = v \cdot A \quad (2)$$



Fig. 10. Instalación de gabinete de control con sus accesorios.

En la **Figura 11** se observa la entrada de Q_1 y Q_2 correspondientes a la válvula reguladora. Así como la configuración interna de la válvula reguladora de caudal correspondiente al pistón de doble efecto. En la posición de Q_1 se alimenta la

válvula con el aire proveniente del compresor, y en la salida Q_2 se conecta el pistón.

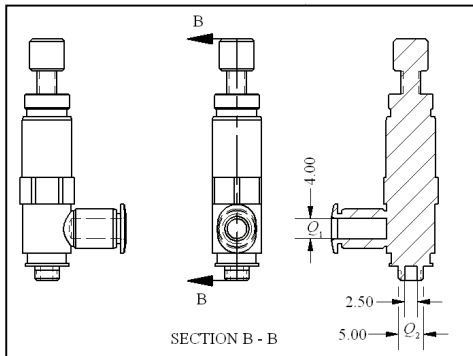


Fig. 11. Vista de las posiciones de conexión y constitución interna de la válvula reguladora (acot.: mm).

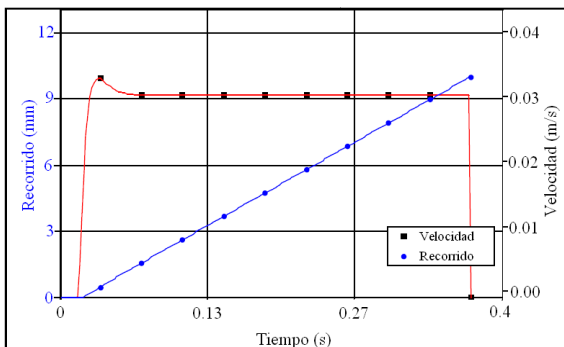
Con lo anterior se obtiene lo siguiente:

- $Q_2 = 0.000157l/s$
- $v_1 = 12.5 \text{ mm/s}$

Estos valores corresponden al caudal y velocidad de la válvula reguladora, con ellos se obtienen las velocidades teóricas en el pistón de doble efecto. Este procedimiento se realiza para cada actuador neumático. Con el monitoreo de los cilindros neumáticos, se obtienen las Gráficas 1 y 2, las cuales indican el comportamiento del cilindro a lo largo de la tarea a realizar. Los datos considerados son los siguientes:

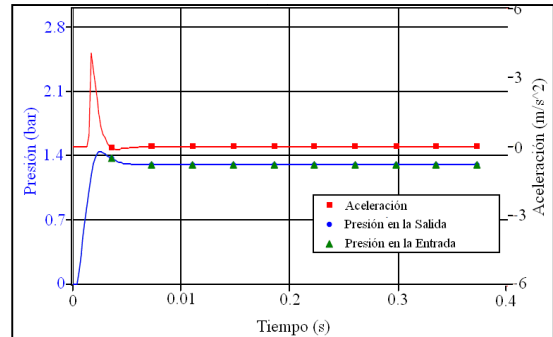
- Longitud de carrera requerida: *10 mm*.
- Presión de funcionamiento: *6 bar*.
- Masa en movimiento: *1.62 grs*.
- Tiempo total de recorrido: *0.375 s*.

En la **Gráfica 1** se observa el comportamiento del pistón de 12 milímetros de carrera de simple efecto, arroja un comportamiento proporcional en cuanto al recorrido vs tiempo.



Gráfica 1. Resultados cilinro simple efecto; Tiempo-Recorrido-Velocidad.

La **Gráfica 2** muestra el comportamiento del mismo cilindro de simple efecto con respecto a la presión y aceleración.



Gráfica 2. Resultados obtenidos cilindro simple efecto; Tiempo-Presión-Aceleración.

7. Prototipo final

Ya con el diseño análtico y numérico, se continúa con el proceso de manufactura del alimentador, el cual no requiere de procesos complejos, únicamente cortes de perfil, uniones soldadas, elaboración de barrenos, pintura, colocación del gabinete de control e instalación de los componentes alojados en su interior, como las electroválvulas y cajas de conexión, así mismo se programa el P.L.C. En la **Figura 12** se muestra una fotografía correspondiente al alimentador ya como producto final, donde se representa en color amarillo la lámina que aloja en su interior a la bobina correspondiente al vibrador electromagnético, en su parte superior se visualiza el tazón donde es depositada la materia prima, los alimentadores de cospeles y otros dispositivos propios que conforman al alimentador.

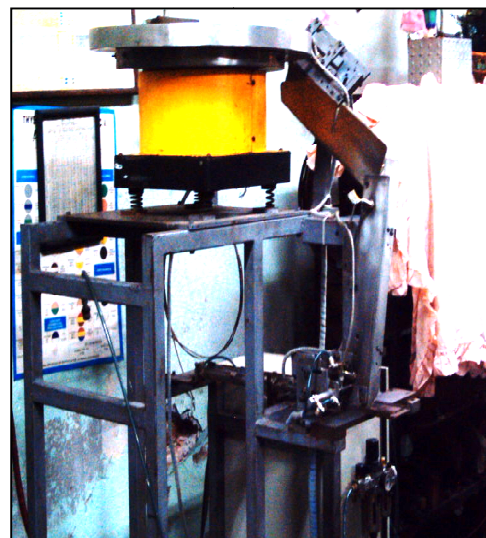


Fig. 12. Alimentador de cospeles final.

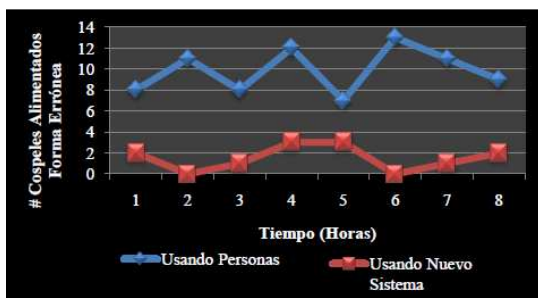
8. Resultados finales obtenidos

1. Se obtuvo una alimentación final de 72.5 piezas por minuto, (1.2 pzas/s). Este dato se obtiene después de elaborar varias pruebas, en las cuales se obtuvo en promedio esta cantidad. Esta cantidad aumenta variando la vibración de la bobina y el caudal de admisión de los pistones, en estudios posteriores se alcanzaron alimentaciones de hasta 2 piezas por segundo. En este estudio se decide manejar la cantidad de 1.2 pzas/s debido a que la máquina fue sometida a un intenso ciclo de trabajo y ajustar los parámetros con otras velocidades implicaría nuevamente una inversión de tiempo. La **Tabla 2**, muestra la producción de sellos de monoblock obtenidos durante una hora, en comparación con los obtenidos en una posición de trabajo en el mismo intervalo de tiempo. Se observa que la cantidad de sellos o cospeles embutidos fue casi del doble con respecto al método manual.

2. De la misma forma, usando el nuevo sistema de alimentación se reduce el número de cospeles introducidos de forma errónea en la matriz del troquel. En la **Gráfica 3** se observa el valor obtenido al final de cada jornada laboral. Estos valores dependerán en gran medida de la habilidad del operador y de la calidad del cospel.

Tabla 2. Sellos de monoblock obtenidos por hora.

| TIEMPO (MINUTOS) | # SELLOS DE MONOBLOCK OBTENIDOS | |
|------------------|---------------------------------|---------------|
| | 1 POSICIÓN | NUEVO SISTEMA |
| 1 | 35 | 72 |
| 5 | 175 | 360 |
| 10 | 350 | 720 |
| 15 | 525 | 1080 |
| 20 | 700 | 1440 |
| 25 | 875 | 1800 |
| 30 | 1050 | 2160 |
| 60 | 2100 | 4320 |



Gráfica 3. Cantidad de cospeles introducidos de forma errónea durante una jornada laboral de 8 horas.

3. Otro punto importante es el costo de este alimentador en comparación con otros que existen en el mercado.

- Costo final del nuevo alimentador automático: \$136 mil pesos. Con todos los gastos generados e impuestos incluidos.
- Costo de otros sistema de colocación de piezas elaborado por FESTO PNEUMATIC SA de CV: \$550 mil pesos. Más gastos de transportación, más gastos por capacitación y operación, más impuestos.

9. Conclusiones

- Se evita la interacción directa operador-máquina, y se reduce significativamente la posibilidad de que ocurra algún accidente hacia el operador.
- Con el diseño de sistema de alimentación se aumenta la producción de piezas y al mismo tiempo se mejora la calidad del producto final reduciendo drásticamente las piezas que son mal formadas, con el nuevo sistema de alimentación es posible obtener una alimentación de cospeles mayor, esto en función del material y sus características físicas.
- Se diseñó de manera satisfactoria un dispositivo que se encarga de llevar a cabo la automatización de un proceso.
- Finalmente, en comparación con otros dispositivos, los costos totales para la fabricación de uno con respecto a otro varían de forma significativa.

Referencias

- [1] Amstead, B. H., Ph. Oswald, F., Begeman, L. *Procesos de Manufactura*, Edit.: C. E. C. S. A. México, 2002.
- [2] Boothroyd, G. *Fundamentals of Machining and Machine Tools*, Edit. CRC Pr. I. Llc, 2005.
- [3] Aceromex. *Catálogo de Perfiles Estructura Rectangulares*, México, 2009.
- [4] Meixner, H., Kobler, R. *Introducción en la Neumática: Manual de Estudio*, Edit.: FESTO, 1988.