

Optimizing Design of Experiments an Injection Process of Plastic

Juan Sillero Pérez, PhD.¹

¹ Universidad de Monterrey, México, juan.sillero@udem.edu

Abstract— The methodology of Design of Experiments was used to optimize a plastic injection process in a factory to make auto parts components. Previous process efficiency diagnostic study revealed the need to reduce the cycle time on a line that produces certain plastic components that are assembled and have the final product called Intake Manifold, which is the air intake filter used in internal combustion engines. To optimize the injection process a full factorial design 24 was used with four critical factors in the operation and two levels each: Hold time (4, 8 seconds), Pack pressure (660, 780 psi), Shot size (7.7, 8.3 inches) and Transfer (1.33, 1.65 inches) position; the final results showed statistical significance for factors; hold time, Pack pressure and Transfer position. The found optimum conditions were hold time 8 seconds, pack pressure 780 psi and Transfer position 1.65 inches. Once carried out the new operating conditions, the cycle time of the process was improved in two injection machines. Machine 15 reduced its cycle times from 80 to 65 seconds, and machine 17 reduced its cycle time from 78 to 65 seconds. This new operational conditions eliminated the bottleneck in the process.

Keywords— auto parts, Intake Manifold, processes optimization, design of experiments, plastic injection machines

Digital Object Identifier (DOI): <http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2015.1.1.145>

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

ISSN: 2414-6668

13th 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/LACCEI2015.1.1.145>

Diseño de Experimentos Optimizando un Proceso de Inyección de plásticos

Juan Sillero Pérez, PhD.
Universidad de Monterrey, México, juan.sillero@udem.edu

Resumen– La metodología del diseño de experimentos se usó para optimizar un proceso de inyección de plásticos en una fábrica de componentes de autopartes. Un estudio diagnóstico reveló la necesidad de reducir el tiempo de ciclo en una línea que produce ciertos componentes de plástico que se ensamblan y tienen el producto final denominado Intake Manifold, el cual es el filtro de entrada de aire para motores de combustión interna. Para optimizar el proceso de inyección se usó un diseño full factorial 2^4 con cuatro factores críticos en la operación y dos niveles cada uno: Hold time (4, 8 segundos), Pack pressure (660, 780 psi), Shot size (7.7, 8.3 pulgadas) y Transfer position (1.33, 1.65 pulgadas); el resultado arrojó significancia estadística para los factores hold time, Pack pressure y Transfer position. Las condiciones óptimas encontradas fueron hold time 8 segundos, pack pressure 780 psi y Transfer position 1.65 pulgadas. Una vez llevadas al piso las nuevas condiciones de operación, se logró reducir los tiempos de ciclo de las inyectoras 15 y 17 pasando respectivamente de 80 a 65 segundos y de 78 a 65 segundos y con ello la eliminación del cuello de botella en el proceso.

Palabras clave- Autopartes, Intake Manifold, Optimización de procesos, Diseño de Experimentos, inyectoras de plásticos

Abstract – The methodology of Design of Experiments was used to optimize a plastic injection process in a factory to make auto parts components. Previous process efficiency diagnostic study revealed the need to reduce the cycle time on a line that produces certain plastic components that are assembled and have the final product called Intake Manifold, which is the air intake filter used in internal combustion engines. To optimize the injection process a full factorial design 2^4 was used with four critical factors in the operation and two levels each: Hold time (4, 8 seconds), Pack pressure (660, 780 psi), Shot size (7.7, 8.3 inches) and Transfer position (1.33, 1.65 inches) position; the final results showed statistical significance for factors; hold time, Pack pressure and Transfer position. The found optimum conditions were hold time 8 seconds, pack pressure 780 psi and Transfer position 1.65 inches. Once carried out the new operating conditions, the cycle time of the process was improved in two injection machines. Machine 15 reduced its cycle times from 80 to 65 seconds, and machine 17 reduced its cycle time from 78 to 65 seconds. This new operational conditions eliminated the bottleneck in the process.

Key words-auto parts, Intake Manifold, processes optimization, design of experiments, plastic injection machines

I. INTRODUCCIÓN

El producto ensamblado por la línea *Upper Pentastar* es el componente llamado *Intake Manifold* (Figura 1), el cual consiste en un ensamble conectado al carburador del sistema

de inyección del motor. Esta parte permite el paso de la mezcla de aire para la combustión de manera precisa a los cilindros.



Figura 1. Motor con componente Intake Manifold

El proceso de fabricación del producto inicia con el moldeado de las partes *lower*, *middle* y *upper Shell* las cuales se desplazan por la banda de enfriamiento ajustando la velocidad para que cada cavidad sea sometida al mismo tiempo de enfriamiento. Después de ser enfriadas, un operario remueve el excedente de plástico en ciertas áreas de la pieza y las coloca en la máquina de soldado por vibración. Al final se ensamblan con una serie de tornillos asegurando que la pieza no filtre aire; también se ensambla la garganta de control electrónico y el sensor MAP. Se finaliza con una prueba de fugas y el producto se empaqueta para ser enviado al cliente.

La línea de inyección *Upper Pentastar* consiste de cinco diferentes inyectoras y cinco moldes diferentes los cuales se procesan como sigue:

- Máquina 20, molde 50591 (componente *Lower* y *Middle shell*, cavidad 1)
- Máquina 19, molde 50592 (componente *Lower* y *Middle Shell*, cavidad 2)
- Máquina 17, molde 50593 (componente *Upper Shell*, cavidad 1 y 2)
- Máquina 15, molde 70040 (componente *Lower* y *Middle Shell*, cavidad 3)
- Máquina 18, molde 70041 (componente *Upper Shell*, cavidad 3 y 4)

Después de la inyección del componente, un robot es el encargado de retirar las piezas de la máquina inyectora y

colocarlas sobre una banda transportadora que cuenta con una banda de enfriamiento (mejor conocido en planta como *cooling conveyor*) donde la pieza es enfriada para que conserve sus propiedades físicas. El traslado y enfriado concluye en la siguiente estación de por vibración.

El proceso de soldado se divide en dos, llamados primera y segunda etapa. La primera etapa consiste en el soldado de los productos moldeados de las inyectoras número 18, 19 y 20 o bien los moldes 50591, 50592 y 70041. Es decir el soldado de los componentes *Lower* y *Middle shell*. Este proceso es realizado por dos máquinas soldadoras por vibración, las cuales son llamadas *Welder 1* y *Welder 2*. Al finalizar, el sub-ensamble es colocado en una banda que transporta el componente hacia el siguiente proceso.

El siguiente proceso consiste en la segunda etapa de soldado donde se suelda el sub-ensamble de *Lower/Middle Shell* con el componente *Upper Shell*. El sub-ensamble se suelda con los componentes moldeados en las inyectoras 15 y 17 o bien los moldes 50593 y 70040. Terminando el proceso de segunda etapa de soldado, los componentes son dirigidos a la etapa de ensamble donde tres estaciones la 10, 15 y 20 son las responsables de integrar en un ensamble todos los componentes.

El proceso finaliza con dos pruebas de calidad. La primera es la prueba de fugas en la cual las máquinas *leak testers* comprueban que no se presenten fugas de aire. La segunda prueba es la inspección visual realizada por operarios. Una vez inspeccionadas, las piezas son colocadas en los contenedores de producto final con capacidad de almacenar 24 piezas.

II. DESCRIPCION DEL PROBLEMA

Un par de años atrás, la empresa ha establecido el métrico *Overall Equipment Effectiveness* (OEE) como KPI de su desempeño. Este métrico se obtiene del producto de tres componentes: calidad (FTY), disponibilidad (*availability*) y desempeño (*performance*). Los datos del OEE que se muestran en la figura 2, muestran un problema de disponibilidad cuyo promedio es el más bajo de los tres componentes.

Al analizar las causas de la baja disponibilidad se encontró con un tener un elevado Tiempo de ciclo de inyección. Este hecho es una de las causas por la que la inyección representa el cuello de botella de la línea, misma que rebasa el *Takt time*. Para eliminar el cuello de botella se decide utilizar el Diseño de Experimentos para encontrar las variables que afectan al tiempo de inyección y establecer los parámetros óptimos en cada inyectora. Entonces, el problema

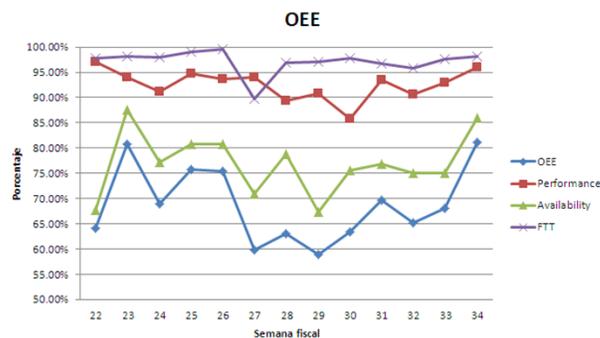


Figura 2. Históricos del indicador OEE

queda ubicado en el área de inyección, la cual es la que marca el ritmo de la producción; al no disponer de componentes para poder ensamblar, se provoca una ineficiencia en la línea, un retraso hacia el cliente y un hasta un posible “paro de planta”. El presente proyecto entonces, es parte de una iniciativa mayor de la planta en cuestión que busca mejorar sus indicadores clave de desempeño [1].

El mayor problema ocurre en el producto *Upper*. El cual se procesa específicamente en las inyectoras 15 y 17. Ambas se encuentran saturada y apenas cumplen con los requerimientos del cliente. Sus tiempos de ciclo son altos y se estima que puede encontrarse la manera de hacer más eficiente su proceso de inyección a través de un diseño de experimentos

III. DISEÑO DEL EXPERIMENTO

El diseño de experimento busca encontrar las condiciones óptimas para agilizar el proceso de producción de la parte *Upper* y eliminar el cuello de botella que actualmente existe. Se inicia con la elección de los factores que se supone influyen en el proceso de inyección de plásticos para producir piezas que al final pasen el filtro de calidad. Tomando como base la literatura disponible relacionada con el proceso de inyección de plástico [2, 3, 4, 5] y conjuntamente con los ingenieros de máquinas y procesos, así como con la literatura del Diseño y Análisis estadístico de Experimentos [6, 7, 8] se eligieron los factores y establecieron los niveles de cada factor como sigue: Shot Size (7.7, 8.3 pulgadas), Transfer Position (1.35, 1.65 pulgadas), Pack Pressure (660, 780 psi), Holding Time (4, 8 segundos).

El diseño se corrió como un diseño factorial 2^4 y las hipótesis estadísticas a probar para cada uno de los factores están expresadas por medio de la hipótesis nula H_0 la cual establece que no existe efecto del factor correspondiente (efecto igual a cero) y la hipótesis alternativa H_a la cual indica que sí existe efecto del factor (efecto diferente de cero):

Shot Size: Ho: $\tau_i = 0$
 Ha: $\tau_i \neq 0$

Transfer Position: Ho: $\beta_j = 0$
 Ha: $\beta_j \neq 0$

Pack Pressure: Ho: $\lambda_k = 0$
 Ha: $\lambda_k \neq 0$

Holding Time: Ho: $\omega_r = 0$
 Ha: $\omega_r \neq 0$

La metodología usada consta de ocho pasos:

1. Definir problema práctico.
2. Diseño a usar.
3. Definir variable(s) de respuesta
4. Establecer los factores y sus niveles a considerar
5. Correr el experimento
6. Determinar nivel de significancia Alfa
7. Analizar los datos del experimento
8. Obtener conclusiones estadísticas y prácticas

Los detalles de cada punto se muestran a continuación:

Paso 1. Problema práctico. ¿Qué factores en el proceso de inyección de plástico influyen en la fabricación de la pieza Upper para que esta sea de calidad y se fabrique en el menor tiempo?

Paso 2. Diseño a usar: full factorial 2k

Paso 3. Definir las variables de respuesta: Peso total de la pieza, W-Etapa1, y W-Etapa2. El peso total se refiere al peso en libras de la pieza al salir del proceso de inyección; W-Etapa1 es el tiempo en segundos de procesamiento en la soldadora 1 y W-Etapa2 es el tiempo en segundos de procesamiento en la soldadora 2.

Paso 4. Los factores y los niveles son: Shot Size (7.7, 8.3 pulgadas), Transfer Position (1.35, 1.65 pulgadas), Pack Pressure (660, 780 psi), Holding Time (4, 8 segundos)

Paso 5. Correr el experimento. Los datos de la tabla 1. Muestran los resultados obtenidos para cada una de las tres variables de respuesta.

Paso 6. Nivel de significancia. Se decide utilizar un alfa de 0.05 para analizar los resultados del experimento

Paso 7. Análisis de los datos. El análisis de varianza de las tres variable de respuesta se hizo con el modelo completo y el modelo reducido usando un nivel alfa de 0.05. A continuación se muestran para cada variable de respuesta el

TABLA 1. FACTORES, NIVELES y DATOS DEL DISEÑO						
FACTORES				VARIABLES DE RESPUESTA		
Shot Size	Transfer Position	Hold Time	Pack Pressure	Peso total	W-Etapa1	W-Etapa2
7.7	1.35	4	660	2.42	11.36	17.76
8.3	1.35	4	660	2.43	11.28	17.22
7.7	1.65	4	660	2.42	13.76	20.90
8.3	1.65	4	660	2.42	12.51	18.36
7.7	1.35	8	660	2.46	8.24	13.62
8.3	1.35	8	660	2.45	8.73	14.31
7.7	1.65	8	660	2.45	8.97	14.65
8.3	1.65	8	660	2.45	9.07	14.36
7.7	1.35	4	780	2.44	10.22	15.24
8.3	1.35	4	780	2.45	9.93	14.79
7.7	1.65	4	780	2.44	10.91	17.09
8.3	1.65	4	780	2.44	11.44	16.74
7.7	1.35	8	780	2.49	7.70	12.22
8.3	1.35	8	780	2.49	9.24	12.68
7.7	1.65	8	780	2.48	8.36	12.20
8.3	1.65	8	780	2.49	8.29	12.81

gráfico Normal de efectos, la tabla ANOVA del modelo reducido, la ecuación de respuesta y el grafico de efectos principales.

A. Variable de respuesta: Peso total

El análisis de los datos se hizo en el software Minitab [9], a continuación se muestran las salidas para la variable de respuesta Peso total. La figura 2 es la Gráfica de normalidad,

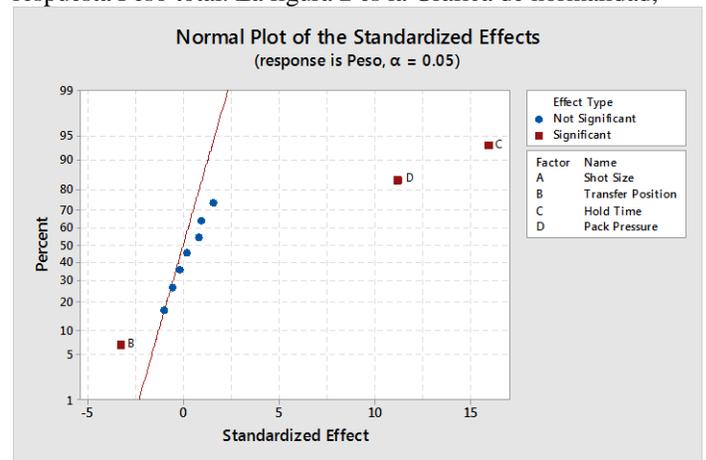


Figura 2. Gráfica normal de efectos. Variable de respuesta Peso total

donde los factores B, C y D aparecen ser significativos. La figura 3 contiene la tabla ANOVA la cual muestra los p-valores que confirman la significancia de los factores anteriores, y por último la Figura 4 muestra la gráfica de efectos principales destacando Hold time, Pressure pack y Transfer Position respectivamente con mayores efectos.

Analysis of Variance					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	3	0.008719	0.002906	151.05	0.000
Linear	3	0.008719	0.002906	151.05	0.000
Transfer Position	1	0.000235	0.000235	12.22	0.004
Hold Time	1	0.005675	0.005675	294.95	0.000
Pack Pressure	1	0.002809	0.002809	145.99	0.000
Error	12	0.000231	0.000019		
Total	15	0.008950			

Model Summary				
S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)	
0.0043864	97.42%	96.78%	95.41%	

Figura 3. Análisis de varianza. Variable de respuesta Peso total

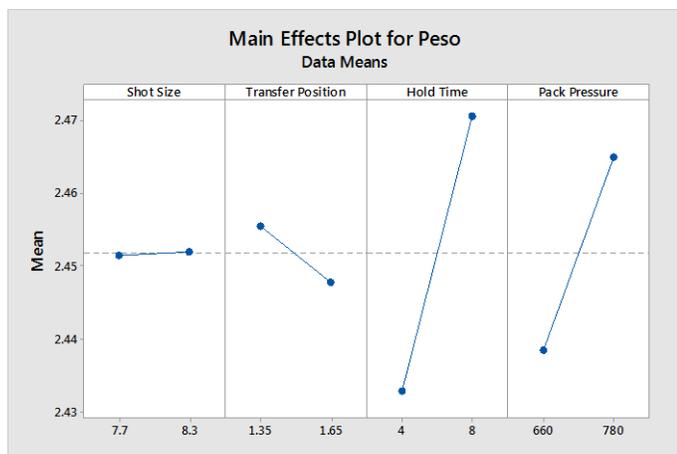


Figura 4. Gráfica de efectos principales. Variable de Respuesta Peso total

La salida de Minitab también proporciona la ecuación de respuesta para la variable Peso total.

$$\text{Peso total} = 2.2746 - 0.02556 \text{ Transfer Position} + 0.009417 \text{ Hold Time} + 0.000221 \text{ Pack Pressure} \quad (1)$$

B. Variable de respuesta: W-Etapa 1

Las salidas de Minitab para el análisis de la variable de respuesta W-Etapa 1, se muestran a continuación. La figura 5 es la Gráfica de normalidad, donde los factores B, C, D y la interacción BC aparecen ser significativos. La figura 6 contiene la tabla ANOVA la cual muestra los p valores que confirman la significancia estadística de anteriores factores y la interacción correspondiente, y por último la Figura 7

muestra la gráfica de efectos principales destacando nuevamente Hold time, Pressure pack y Transfer Position respectivamente con mayores efectos.

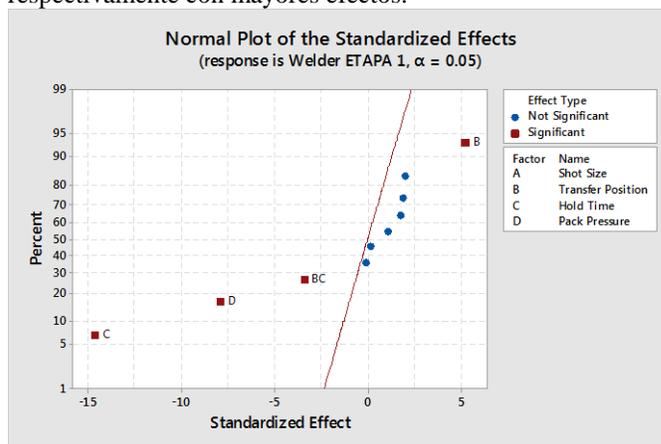


Figura 5. Gráfica normal de efectos. Variable de respuesta Welder Etapa 1

Analysis of Variance					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	4	40.058	10.0144	49.97	0.000
Linear	3	38.593	12.8645	64.20	0.000
Transfer Position	1	3.478	3.4782	17.36	0.002
Hold Time	1	27.228	27.2275	135.87	0.000
Pack Pressure	1	7.888	7.8877	39.36	0.000
2-Way Interactions	1	1.464	1.4641	7.31	0.021
Transfer Position*Hold Time	1	1.464	1.4641	7.31	0.021
Error	11	2.204	0.2004		
Total	15	42.262			

Model Summary				
S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)	
0.447651	94.78%	92.89%	88.96%	

Figura 6. Análisis de varianza. Variable de respuesta Welder Etapa 1

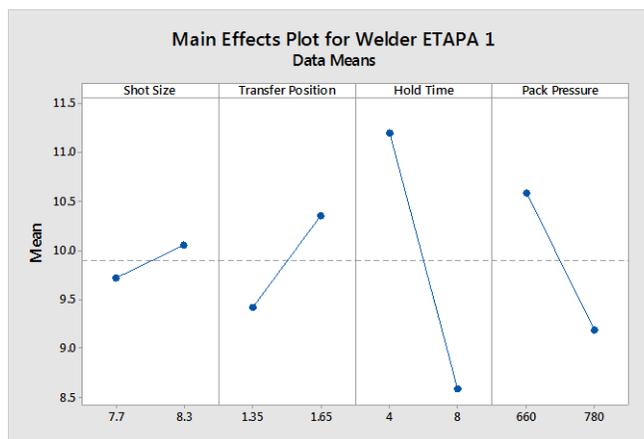


Figura 7. Gráfica de efectos principales. Variable de respuesta Welder Etapa 1

La ecuación de respuesta obtenida es:

$$W\text{-Etapa 1} = 8.49 + 9.16 \text{ Transfer Position} + 0.860 \text{ Hold Time} - 0.01170 \text{ Pack Pressure} - 1.008 \text{ Transfer Position} * \text{Hold Time} \quad (2)$$

C. Variable de respuesta: W-Etapa 2

El análisis de la variable de respuesta W-Etapa 2, se muestran a continuación. La figura 8 es la Gráfica de normalidad, donde los factores B, C, D y la interacción BC aparecen ser significativos. La figura contiene la tabla ANOVA la cual muestra los p valores que confirman la significancia estadística de anteriores factores y la interacción correspondiente, y por último la Figura 10 muestra la gráfica de efectos principales destacando nuevamente Hold time, Pressure pack y Transfer Position respectivamente con mayores efectos.

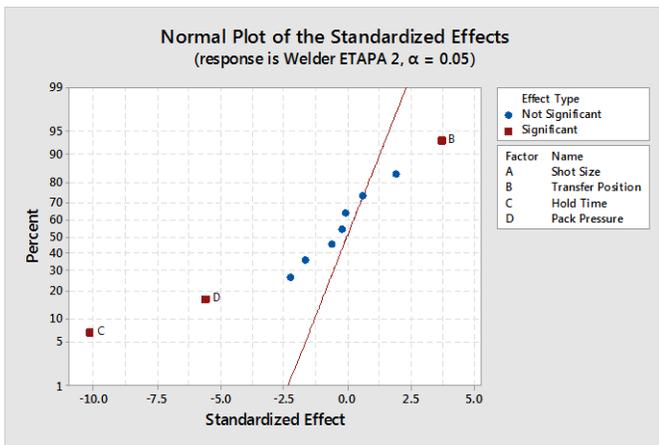


Figura 8. Gráfica normal de efectos. Variable de respuesta Welder Etapa 2

Analysis of Variance					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	3	67.517	22.5055	34.35	0.000
Linear	3	67.517	22.5055	34.35	0.000
Transfer Position	1	6.350	6.3504	9.69	0.009
Hold Time	1	46.991	46.9910	71.73	0.000
Pack Pressure	1	14.175	14.1752	21.64	0.001
Error	12	7.861	0.6551		
Total	15	75.378			

Model Summary			
S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.809389	89.57%	86.96%	81.46%

Figura 8. Análisis de varianza. Variable de respuesta Welder Etapa 2

Ecuación de respuesta:

$$W\text{- Etapa 2} = 25.65 + 4.20 \text{ Transfer Position} - 0.857 \text{ Hold Time} - 0.01569 \text{ Pack Pressure} \quad (3)$$

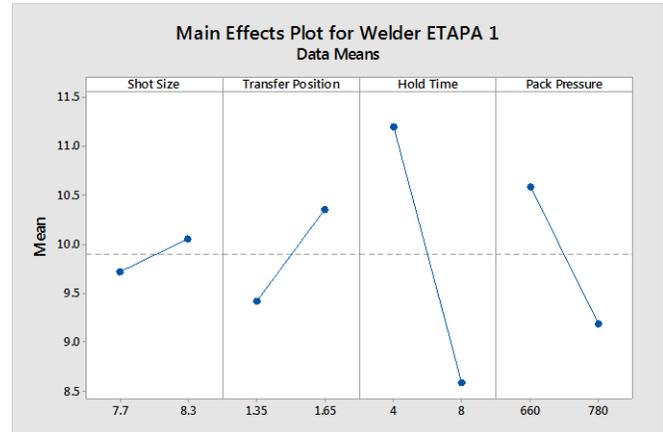


Figura 10. Gráfica de efectos principales. Variable de respuesta Welder Etapa2

D. Resumen de conclusiones estadísticas.

Para la variable de respuesta Peso Total, los factores que resultaron significativos a un alfa de 0.05 son: Transfer Position, Hold Time y Pack pressure.

Para la variable de respuesta W-Etapa 1, los factores que resultaron significativos a un alfa de 0.05 son: Transfer Position, Hold Time y Pack pressure. También resultó significativa la interacción Transfer Position*Hold Time

Para la variable de respuesta W-Etapa 2, los factores que resultaron significativos a un alfa de 0.05 son: Transfer Position, Hold Time y Pack pressure.

En suma, son primordialmente significativos los factores Transfer Position, Hold Time y Pack pressure. Cuando están en sus niveles altos influyen favorablemente en la variable de respuesta Peso total, de igual forma favorecen a las variables de respuesta W-Etapa 1 y W-Etapa 2; estas últimas provocan disminuir el tiempo en el proceso de soldadura.

E. Recomendaciones prácticas.

Considerando que a mayor peso es menor el tiempo de ciclo de soldado y que las piezas cumplen con el estándar de calidad sin presentar fugas, las recomendaciones del experimento para operar las máquinas de inyección consisten en los parámetros siguientes:

- *Hold time:* 8 segundos
- *Pack pressure:* 780 psi
- *Shot size:* cualquiera en el rango de 7y 8.3 pulgadas
- *Transfer position:* 1.65 pulgadas

IV. RESULTADOS

Al operar las inyectoras 15 y 17 con las condiciones operativas recomendadas anteriormente se logró mejorar significativamente los tiempos de ciclo al mismo tiempo que eliminar el cuello de botella que se tenía. Las mejoras alcanzadas en término de tiempos de ciclo se muestran con los resultados observados durante las nuevas condiciones de operación y fueron como sigue:

INYECTORA NÚMERO	Tiempo de ciclo (antes)	Tiempo de ciclo (después)
15	80	65
17	78	65

V. CONCLUSIONES

La metodología de Diseño de Experimento fue usada en el proceso de optimización de una inyectora de plásticos en una fábrica de componentes de autopartes. El análisis estadístico propio de esta metodología permitió encontrar los niveles de operación que favorecen el logro de los mejores resultados en el proceso de fabricación de las autopartes. Una vez llevadas al piso esas nuevas condiciones de operación, se logró reducir los tiempos de ciclo de las inyectoras 15 y 17 pasando respectivamente de 80 a 65 segundos y de 78 a 65 segundos y con ello la eliminación del cuello de botella en el proceso y una notable mejora en los niveles de productividad de la planta.

REFERENCES

- [1] Sillero, J. “Mejora operativa de la línea Upper Pentastar de Chrysler”, *Proceedings of the Tenth LACCEI Latin American and Caribbean Conference*. Panamá 2012.
- [2] Philip, M. “Injection Molding. Tool and Manufacturing”. *Engineers Handbook*. Vol. 8. 4th ed. Dearborn, MI. Society of Manufacturing Engineering, 1996, 6-1–6-2.
- [3] Oles, R. r., & Powers, S, “Plastic Injection Molding Starts with the Pellet”. *Moldmaking Technology Magazine*, 2015, 18(1), 20-21.
- [4] Bharti, P. K., Singh, H., & Khan, M. I. (2012). “Recent methods for optimization of plastic injection molding process -- A retrospective and literature review”. *Popular Plastics & Packaging*, 2012, 57(9), 26-36.
- [5] Processing of plastics. (2009). *Popular Plastics & Packaging*, 54(8), 37-44.
- [6] Montgomery, D.C. *Diseño y Análisis de Experimentos* 2a. ed. México: Limusa Wiley, 2007, pp 387-301,
- [7] Gutierrez Pulido, H., *Análisis y diseño de experimentos*, 3a ed., McGraw Hill, 2012, pp 209-220
- [8] Kuehl, R, *Diseño de Experimentos*, 2ª Ed. Thompson Learning, 2001, pp391-421
- [9] MINITAB Release 17, Statistical Software. State College, PA: MINITAB Inc. (2014)