

Implementación de la mejora continua en el método de trabajo de una celda de manufactura de inyección de plástico, con el fin de obtener una reducción de los productos defectuosos manufacturados y los costos de producción.

Pedro Moreno Vazquez¹, Cesar E. Aviña Berumen¹, Hugo J. Becerra Reyes¹

¹Universidad Tecnológica de Calvillo. Carretera al Tepetate N° 102 Colonia El Salitre, Calvillo, Aguascalientes, pedro.moreno@utcalvillo.edu.mx, cesar.avina@utcalvillo.edu.mx, hugo.becerra@utcalvillo.edu.mx

Resumen

La presente investigación evalúa si el implementar la mejora continua en el método de trabajo de una celda de manufactura de inyección de plástico beneficia o no significativamente la reducción de los productos defectuosos manufacturados y la disminución de los costos de producción, con la finalidad de buscar la causa raíz que origina el elevado porcentaje de productos defectuosos, actualmente en Aguascalientes México, la competitividad de las empresas líderes en el sector de inyección de plástico para la industria automotriz es mucha y las empresas que pretenden posicionarse en la misma condición, trabajan buscando mejorar la calidad y los precios, las empresas líderes del sector deben siempre mejorar sus productos y procesos para mantener a sus clientes y su mercado. Los resultados obtenidos en la presente investigación permiten visualizar si el implementar un programa de mejora continua en la celda de manufactura de inyección de plástico, asegura la disminución de los productos defectuosos inyectados y aumentar la calidad en los productos terminados, con el fin de obtener una reducción de costos.

Palabras Clave– Mejora Continua, Celda de manufactura, inyección de plástico.

I. Introducción

En las investigaciones se pueden encontrar trabajos que tratan sobre la importancia de la mejora continua en los sistemas de trabajo. En estos trabajos se comenta sobre la importancia de la reducción de costos de producción para lograr la supervivencia de las empresas, que es un elemento fundamental para lograr disminuir los tiempos muertos de la maquinaria y la fabricación de productos defectuosos.

Actualmente las empresas líderes en el mercado y las que pretenden posicionarse en la misma condición, no siempre trabajan con la fabricación de un producto único, necesitan tener una variedad de estos, con el fin de cubrir la demanda del mercado y las diferentes necesidades de los clientes. Lo que trae como consecuencia para las empresas la evolución y adaptación de su filosofía de trabajo, con el fin de convertirla a un sistema de manufactura flexible, que le permita lograr la eficiencia y calidad demandada por los clientes y superar los productos de su competencia en el mercado [1].

La presente investigación surge con la finalidad de diseñar e implementar una metodología de mejora continua en una celda de manufactura de inyección de plástico, debido a que el número de piezas defectuosas generadas en la celda de manufactura es muy elevado y la materia prima utilizada en el proceso no se puede reutilizar, el análisis se hace con un producto para la industria automotriz el cual se tienen tolerancias de apariencia y textura muy cerradas, lo que genera un elevado número de piezas defectuosas.

En la empresa se tiene el 100% de las operaciones estandarizadas, pero en ocasiones las actualizaciones a las Hojas de Operación Estándar (HOE) no se realizan en tiempo y forma, algunas mejoras no se registran, lo que genera que un turno trabaje con la metodología obsoleta en lo que hacen llegar las instrucciones y genere un número más elevado de productos no defectuosos, lo cual tiene como consecuencia el no dar a tiempo la capacitación para los operadores en la actualización de las normas de calidad para la inspección de los productos con los nuevos criterios de calidad.

Un problema adicional a los ya mencionados se da en los altos costos de producción a causa de los costos de manejo de scrap y productos defectuosos, al momento de comparar el precio del producto cotizado y planeado al inicio del proyecto con el costo al terminar la orden de trabajo, se tiene una diferencia significativa en las utilidades esperadas.

La implementación de la metodología de mejora continua en una celda de manufactura de inyección de plástico, se pretende llevar a cabo mediante la revisión y análisis de los datos históricos de los defectivos, buscando la o las posibles causas potenciales que originan la problemática, con el fin de disminuir los costos de producción y el número de piezas defectuosas generadas, lo que tiene como consecuencia el aumento del nivel de eficiencia y lograr cumplir los objetivos trazados en el plan de producción.

II. Antecedentes

Actualmente las empresas líderes en el mercado y las que pretenden posicionarse en la misma condición, no siempre trabajan con la fabricación de un producto único, necesitan tener una variedad de estos, con el fin de cubrir la demanda del mercado y las diferentes necesidades de los clientes [1]. Lo que trae como consecuencia para las empresas la evolución y adaptación de su filosofía de trabajo, con el fin de convertirla a un sistema de manufactura flexible, que le permita lograr la eficiencia y calidad demandada por los clientes y superar los productos de su competencia en el mercado.

Un punto muy importante que se tiene que tomar en cuenta es lograr la entera satisfacción del cliente, esto se basa en su percepción de la calidad y está influenciada por las acciones que se tomen en la organización. Estas acciones son las que alimentan los indicadores que evalúan la calidad de los procesos y productos que generan y que contribuyen al ciclo de mejora continua [2].

Los empresarios deben de comprender la importancia de seguir procedimientos de trabajo para que los programas de mejora continua funcionen, por no seguir estos procedimientos establecidos, se llegan a realizar tareas con una demora de tiempo promedio de hasta el 25%, al apoyarse en los procedimientos de trabajo, las demoras desaparecen y los niveles de producción dentro de la empresa no se ven afectados [3].

La finalidad principal de muchas empresas es desarrollar nuevos procesos y productos o la mejora continua de estos. La calidad global de los productos está representada por muchas características de interés, y éstas a la vez, están en función de un conjunto de factores de control [4]

Estadísticamente, está demostrado en estudios que en las organizaciones que no cuentan con una "Gestión de mejora Continua" tienen un volumen de la ineficiencia puede estar entre un 15 y 25 % de sus ventas. Las empresas que, si lo hacen, oscila entre 4 y 6%. La mayoría de los fallos o ineficiencias que configuran el despilfarro son desconocidos, considerados como normales, ignorados y con frecuencia ocultados [2]. Actitudes que impiden buscar soluciones y evitar su repetición.

Krajewski & Ritzman menciona que las organizaciones que trabajan con manufactura esbelta tienen sistemas de operación que maximizan el valor agregado para cada actividad, de tal manera que eliminan el desperdicio y los retrasos. Las metas de un sistema esbelto son eliminar los ocho tipos de desperdicios, producir servicios y productos sólo cuando se necesitan y mejorar de manera continua los beneficios del valor agregado de las operaciones; es así como se encamina a la mejora continua en calidad y productividad

con miras hacia el enfoque de mejoramiento de procesos o Kaizen [5].

Un sistema de Mejora Continua en cualquier empresa, sin importar su giro, debe de iniciar con la estandarización de los procesos y tareas, eliminar de manera sistemática los desperdicios o mudas, lograr tener un nivel de involucramiento y compromiso de todo el personal de la organización, esto debido a que ellos son los especialistas de sus funciones y posiblemente pueden realizar aporte a la estrategia y además del despliegue de la gestión visual multinivel de los indicadores y objetivos correctamente alineados.

El proceso de la industria de inyección de plástico se caracteriza por ser uno de los procesos de producción más complejo. En este sentido se vuelve una actividad que requiere el uso de métodos matemáticos sofisticados y el uso de tecnología avanzada, esto mismo ha llevado a desarrollar infinidad de proyectos de investigación enfocados en auxiliar la tipificación de factores críticos del proceso de inyección de plástico [6].

Se realizó una encuesta en las empresas del sector de inyección plástico en América Latina, esta encuesta se realizó a los fabricantes de molde por inyección acerca del crecimiento económico en sus países para el año en curso, de los cuales el 49% lo consideraron regular y sólo 17% bueno. Asimismo, El 34% de los encuestados declararon que las ventas han disminuido en 2017 respecto al año anterior [7].

Casos de éxitos reflejan que, al aplicar la metodología de mejora continua, se logra reducir los niveles de desperdicios, un claro ejemplo de ello es la reducción de artículos defectuosos en un 49.5% [8], por ello es muy importante implementar la mejora continua en la industria de la inyección de plástico, por ser un sector complejo para su operación y control.

III. Justificación

El mantener un sistema de producción controlado y con un mínimo de defectivos, es una actividad fundamental para cualquier organización. Además de tener un buen sistema para detectar las áreas de oportunidad de mejora y realizar las acciones correctivas correspondientes.

La implementación de la mejora continua en el método de trabajo de una celda de manufactura de inyección de plástico con el fin de lograr la reducción de productos defectuosos y costos de producción es una actividad que debe de llevarse a cabo de manera continua, documentando las acciones realizadas y evitando que, al llegar al objetivo planteado, se dejen de realizar las mejoras y se descuida lo ya realizado.

La mejora continua no debe ser una moda en las empresas, debe de ser una cultura de trabajo, la cual todo el personal que labora sea y se sienta parte importante, el principal problema en las organizaciones es la falta de documentación de las mejoras realizadas o la poca difusión de estas, en ocasiones personal de la misma celda de manufactura, línea de producción o estación de trabajo desconoce las mejoras realizadas en los procesos y trabaja de manera incorrecta.

La falta de comunicación es un problema recurrente en cualquier empresa, en ocasiones no existe un método de trabajo bien establecido para documentar las mejoras, ya que no todo el personal está capacitado para elaborar o interpretar los documentos, lo cual no permite aprovechar al máximo las ventajas de trabajar con un sistema de mejora continua.

El establecer planes de mejora en las empresas, es con el objetivo de estandarizar la forma de trabajo y documentar todas las acciones realizadas con el fin de tener la evidencia del trabajo y poder hacer difusión de este.

IV. Planteamiento del Problema

El implementar la mejora continua en el método de trabajo de una celda de manufactura de inyección de plástico, ¿beneficia significativamente la reducción de los productos defectuosos manufacturados y la disminución de los costos de producción?

V. Hipótesis de Investigación

Las hipótesis de investigación del presente trabajo plantean lo siguiente:

H0: Implementar la mejora continua en el método de trabajo de una celda de manufactura de inyección de plástico no beneficia significativamente la reducción de los productos defectuosos manufacturados y la disminución de los costos de producción.

H1: Implementar la mejora continua en el método de trabajo de una celda de manufactura de inyección de plástico si beneficia significativamente la reducción de los productos defectuosos manufacturados y la disminución de los costos de producción.

VI. Materiales y Métodos

Antes de iniciar las actividades de la investigación, es importante que el personal complete las actividades de conocimiento y capacitación de las medidas de seguridad laboral: Antes de introducir a una persona dentro de la

organización, independientemente del área a la que será dirigida se le da una capacitación.

Esta investigación se llevó a cabo mediante el método propuesto por Roberto Hernández Sampieri, como diseño cuasiexperimental de tipo prueba-posprueba con grupos de control. La investigación es en campo, se recolecta la información necesaria para realizar las inferencias pertinentes.

El procedimiento que se siguió, de manera general, incluye los siguientes pasos:

1.- Obtención de la información mediante datos históricos de la celda de manufactura, con el fin de obtener la situación y comportamiento inicial.

2.- Analizar los resultados de los datos históricos obtenidos para encontrar diferencias en metodologías de trabajo y los parámetros iniciales y finales.

3.- Modificar métodos de trabajo en caso de ser necesario.

4.- En este apartado se analizan los datos obtenidos en la implementación de la mejora continua en el método de trabajo de la celda de manufactura de inyección de plástico, con el principal objetivo de determinar si su implementación beneficia o no significativamente la reducción de los productos defectuosos manufacturados y la disminución de los costos de producción.

Las variables utilizadas se midieron de la siguiente manera:

- Piezas manufacturadas: Se categorizan y registran las piezas defectuosas del área de inyección. Registrando el número de piezas buenas y piezas defectuosas, con el fin de obtener el valor porcentual de cada una de ellas.
- Productividad: Los estándares de producción son la forma de medir esta variable en el estudio, tomando como unidad de medida las piezas fabricadas por hora contra las piezas que están planeadas fabricar.
- Costos de Producción: Registrar el costo directo de fabricar una pieza, tomando en cuenta materia prima, costo herramental, costo de operar maquinaria y mano de obra

5.- Se trataron estadísticamente los datos con el paquete de cómputo Statgraphics 18 Centurion para determinar si existía correlación entre el aumento de la productividad y una buena estandarización de un sistema de inyección y ensamble de disco abrasivo con hoja de lija.

6.- Se documentan las acciones de mejora realizadas, determinando con esto si había un efecto significativo en los

niveles de producción y disminución de la cantidad de piezas defectuosas generadas y los costos de producción.

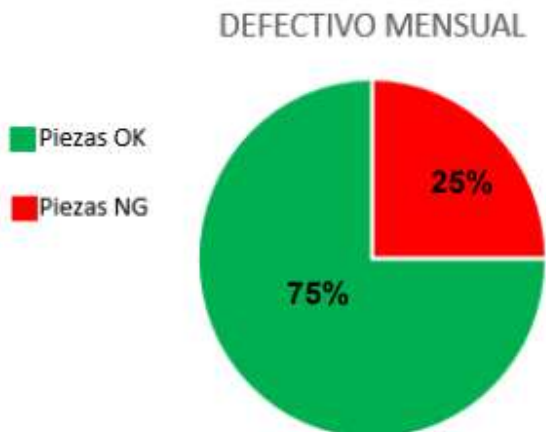
7.- Se concentraron los resultados encontrados.

8.- Establecimiento de conclusiones.

VII. Resultados

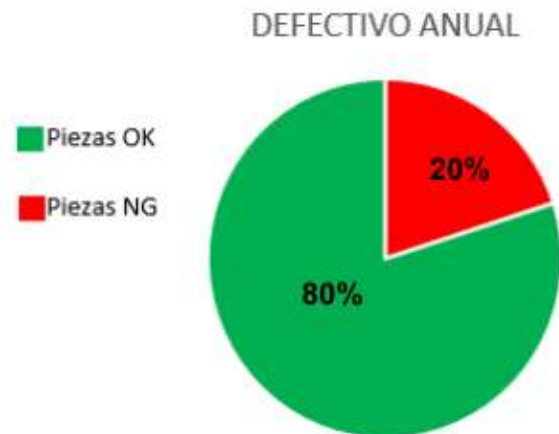
Con esta investigación que se llevó a cabo en una empresa de inyección de plástico, se tuvo la oportunidad de conocer el proceso que tiene una cantidad de productos defectuosos generados alta y por consecuencia un bajo nivel de eficiencia, sin perder de vista que la investigación desde su inicio planteó si un buen plan de mejora continua en una celda de manufactura de inyección beneficia o no significativamente la reducción de los productos defectuosos y la disminución de los costos de producción.

Para comenzar las actividades, se realiza un análisis de los datos históricos para conocer cuál es la cantidad de piezas Holder defectuosas producidas mensualmente por la celda de manufactura de inyección de plástico a analizar.



Gráfica 1. Gráfico mensual de piezas OK y NG producidas por la celda de manufactura de inyección de plástico analizada.

Al ser un porcentaje elevado de productos defectuosos generados, se analizan los datos históricos de un número mayor de periodos mensuales y con ello se obtiene el resultado del último año de trabajo de la celda de manufactura de inyección de plástico con el producto Holder.



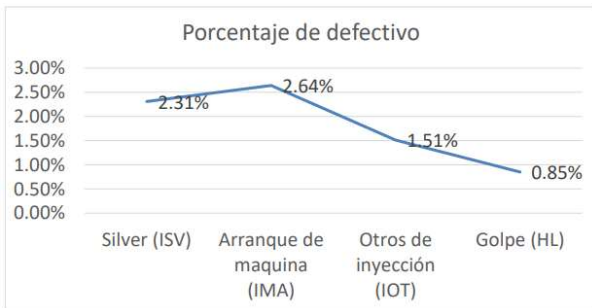
Gráfica 2. Gráfico anual de piezas OK y NG producidas por la celda de manufactura de inyección de plástico analizada.

Adicional a la obtención del porcentaje de piezas defectuosas, se trabaja con los registros de las piezas defectuosas para obtener los defectos más frecuentes, obteniendo cuatro defectos con mayor cantidad de presencia en la producción de Holder que son: arranque de máquina, silver (astillas), poros y golpes.

Lote	Parte	Descripcio	Qty.	Insp.	Piezas OK	Piezas NG	% O.K.	% N.G.	CVL DEF. CANT.	CVL DEF. CANT.	CVL DEF. CANT.		
97L0006	10047-TRC	HOLDER	340	332	8	97.65	2.35	HSC	5	ISV	3	IAB	2
97L0008	10047-TRC	HOLDER	340	337	3	99.12	0.88	MAA	42	IAB	3	IOT	3
97L0009	10047-TRC	HOLDER	340	333	7	97.94	2.06	IOT	15	ISV	4	HL	3
97L0027	10047-TRC	HOLDER	340	339	1	99.71	0.29	IFL	3	ISV	3	HL	1
97L0035	10047-TRC	HOLDER	340	333	7	97.94	2.06	ISV	15	HL	8	IOT	6
97L0036	10047-TRC	HOLDER	340	329	11	96.76	3.24	IAB	11	ISV	6	HL	3
97L0038	10047-TRC	HOLDER	340	335	5	98.53	1.47	MAA	12	IAB	5	IOT	3
97L0039	10047-TRC	HOLDER	340	336	4	98.82	1.18	ISV	10	HL	2	IOT	2
97L0045	10047-TRC	HOLDER	340	337	3	99.12	0.88	ISV	12	IOT	6	IDM	1
97L0053	10047-TRC	HOLDER	340	328	14	96.88	4.12	ISV	17	HL	4	IOT	2
97L0058	10047-TRC	HOLDER	340	335	5	98.53	1.47	IOT	15	ISV	13	ISS	7
97L0061	10047-TRC	HOLDER	340	335	5	98.53	1.47	ISV	8	IOT	7	ISS	5
97L0083	10047-TRC	HOLDER	340	315	25	92.65	7.35	ISV	34	IOT	8	HL	5
97L0087	10047-TRC	HOLDER	340	333	7	97.94	2.06	IOT	21	ISV	15	HL	6
98L0039	10047-TRC	HOLDER	340	336	4	98.82	1.18	IOT	4	ISV	3		
98L0055	10047-TRC	HOLDER	340	335	5	98.53	1.47	IOT	9	ISV	4	ISS	3
98L0061	10047-TRC	HOLDER	340	337	3	99.12	0.88	HSC	14	IMA	8	ISV	8
98L0063	10047-TRC	HOLDER	340	333	7	97.94	2.06	ISV	20	IST	4	HL	3
98L0062	10047-TRC	HOLDER	340	337	3	99.12	0.88	IOT	6	ISV	5	HL	2
98L0084	10047-TRC	HOLDER	340	337	3	99.12	0.88	MAA	20	IOT	4	ISV	1
98L0085	10047-TRC	HOLDER	340	336	4	98.82	1.18	ISV	10	IOT	9	HL	1
98L0086	10047-TRC	HOLDER	340	335	5	98.53	1.47	ISV	18	IOT	14		
98L0087	10047-TRC	HOLDER	340	338	2	99.41	0.59	ISV	7	IOT	5	HL	1
98L0088	10047-TRC	HOLDER	340	336	4	98.82	1.18	ISV	6	IOT	5	HL	1
99L0018	10047-TRC	HOLDER	340	339	1	99.71	0.29	ISV	15	HBK			
99L0034	10047-TRC	HOLDER	340	332	8	97.65	2.35	HSC	3	ISV	3	ISS	2
99L0038	10047-TRC	HOLDER	340	340	0	100	0	MAA	12	ISV	7	HL	1
99L0039	10047-TRC	HOLDER	340	333	7	97.94	2.06	ISV	10	IOT	7	HL	1
99L0069	10047-TRC	HOLDER	340	340	0	100	0	ISV	5	HL			
99L0070	10047-TRC	HOLDER	340	334	6	98.24	1.76	ISV	15	HL	10	ISC	2
99L0074	10047-TRC	HOLDER	340	340	0	100	0	IST	9	ISV	9	HL	7
99L0075	10047-TRC	HOLDER	136	136	0	100	0	ISV	21	HL	5		
99L0076	10047-TRC	HOLDER	340	331	9	97.35	2.65	HL	11	ISV	6	HSC	3
99L0077	10047-TRC	HOLDER	340	340	0	100	0	IMA	72	ISV	27	IOT	2

Figura 1. Base de datos de los productos Holder defectuosos producidas por la celda de manufactura de inyección de plástico analizada.

Después de analizar la base de datos de productos defectuosos, se observa que los defectos más frecuentes son causados por el manejo del operador, no tiene la habilidad o cuidado suficiente para manipular las piezas al salir del molde de inyección.



Gráfica 3. Grafico del porcentaje de piezas defectuosas producidas por la celda de manufactura de inyección de plástico analizada.

Para disminuir el porcentaje de defectuosos, se trabaja de manera inicial con las actividades de operación y manipulación de las piezas, se analiza la metodología de trabajo documentada en las hojas de operación estándar y se asegura que el operador realice las actividades de manera correcta, se observó que en el momento de la extracción de la pieza del molde, el operador tiene dificultad de hacerlo debido a que las piezas se atoran en el molde y por ello las jala y en muchas ocasiones la pieza se cae o se daña. Para disminuir este defecto, se modifican los tiempos de ciclo de la máquina para optimizar los votadores de la pieza del molde y que el operador no manipule la pieza ya fuera del mismo.



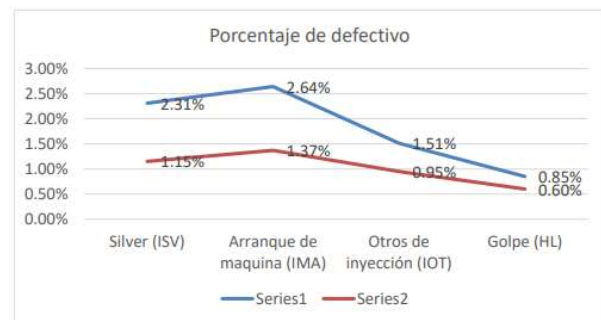
Figura 2. Modo erróneo del operador de extraer pieza del molde de inyección.

Adicional a la mejora del método de trabajo, se analizan los parámetros de temperatura, las especificaciones de producción indican que se tiene que inyectar a 120°C la pieza para no generar piezas defectuosas, se ve en planta que la temperatura con la que se está inyectando es de 95°C



Figura 3. Termorregulador utilizado en la celda de manufactura de inyección de plástico analizada.

La siguiente acción de mejora continua en la celda de manufactura es el cambiar el termorregulador instalado en la celda de manufactura por uno que, si cumple los parámetros de especificación del material y la pieza a inyectar, después de instalar el nuevo termorregulador, se mide el porcentaje de piezas defectuosas manufacturadas y se tiene una mejora significativa, logrando una reducción del 41% de piezas NG generadas.



Gráfica 4. Grafico del porcentaje de piezas defectuosas producidas por la celda de manufactura de inyección de plástico después de cambiar el termorregulador.

Una vez controlada la variable de la temperatura de inyección, se modifica la base de datos en donde se registran los productos defectuosos, después se actualiza la norma de calidad para la inspección del producto Holder.

Inspección Visual		
No.	Puntos de Inspección	Criterio
1	Forma	En zona A se aceptan puntos ≤ 0.3 mm sin formar una línea, mancha o que existan más de tres puntos en la misma área; entre cada punto debe de existir al menos una distancia de 10 cm.
2	Orizamiento	No se acepta. Durante el arranque de y en la inyección se más probable su aparición.
3	Rizajes	No se aceptan en zona A.
4	Manchas	No se aceptan en zona A.
5	Deformación	No se acepta.
6	Rebabas	No se aceptan. La rebaba puede presentarse dentro de sí mismo o en cualquier otra zona de la pieza.
7	Rechape	Comparar con pieza master.
8	Linea	Zona A no se acepta.
9	Fractura	No se acepta.
10	Líneas de Rizo	Zona A no se aceptan, Zona B y C contra master.

Nota: En los puntos de inspección se pone el símbolo de ▲ o todos aquellos que sean defectos importantes para la liberación del personal en inspección.

Figura 4. Norma de inspección del producto después de su actualización.

Como fase final del plan de mejora continua planeado en esta investigación, se procede a capacitar al personal en la actualización de la norma del producto, con el principal objetivo de que conozcan los cambios en la norma de inspección, los nuevos criterios de calidad y puntos de inspección, además de los cambios en el sistema de control de producción que maneja la empresa, para que los registros de los productos defectuosos se realicen de manera correcta.

Después de las acciones de mejora continua realizadas en la celda de manufactura, se da continuidad a las mismas y después del primer mes de trabajo de observa una disminución del 55% de los productos defectuosos generados en comparación con los datos iniciales del proyecto, lo que significa una disminución del 70% de los costos de generación de productos defectuosos.



Gráfica 5. Grafico del porcentaje de piezas defectuosas producidas por la celda de manufactura de inyección de plástico después de las mejoras realizadas.

Las actividades de mejora continua realizadas en la celda de manufactura de inyección de plástico corrobora que la hipótesis nula se rechaza y se acepta la hipótesis alternativa, lo cual significa que implementar la mejora continua en el método de trabajo de una celda de manufactura de inyección de plástico si beneficia significativamente la reducción de los

productos defectuosos manufacturados y la disminución de los costos de producción.

Al término de la presente investigación, se capacito al 100% del personal operativo que participa en el proceso de producción en la celda de manufactura de inyección de plástico, se logra una reducción del 35% en los tiempos de inspección y se tiene un ahorro mensual aproximado de 1,758 dólares mensuales en productos defectuosos no generados.

VII. Referencias

- [1] Moreno-Vázquez, P., Calvillo-Valdez, O. D., & Becerra-Reyes, H. Elementos que benefician la disminución del tiempo de ciclo de una línea de producción: Nivel de afectación de una buena distribución de planta. Revista de Operaciones Tecnológicas, marzo 2018. Vol.2 N°.5, 1-9.
- [2] García P, Manuel, & Quispe A., Carlos, & Ráez G., Luis (2003). Mejora continua de la calidad en los procesos. Industrial Data, 6(1),89-94. ISSN: 1560-9146. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=816/81606112>
- [3] Moreno-Vázquez, P., Calvillo-Valdez, Oscar Daniel. El Mantenimiento Productivo Total "TPM" como factor para el aumento de la productividad y el nivel de aceptación del producto terminado. Revista de Ingeniería Industrial. 2018. 2-3:1-9.
- [4] Domínguez, J. D. (2006). Optimización simultánea para la mejora continua y reducción de costos en procesos. Ingeniería y ciencia, 2(4), 145-162.
- [5] Krajewski, L. J., Ritzman, L. P., & Malhotra, M. K. (2013). Administración de operaciones: Procesos y cadenas de suministro. Pearson educación.
- [6] Pérez-Domínguez, L., Macías-García, J. L., Sánchez-Mojica, K. Y., & Luviano-Cruz, D. (2017). Comparación Método multi-criterio TOPSIS y MOORA para la optimización de un proceso de inyección de plástico. Mundo FESC, 7(14), 98-105.
- [7] Plastics News (2018). Tecnología del Plástico. <https://pet-eu.com/wpcontent/uploads/2018/05/TECNOLOGIA-DEL-PLASTICO-VOL-32-ED-6.pdf>
- [8] Ahmad, N., Hossen, J., & Ali, S. (2018). Improvement of overall equipment efficiency of ring frame through total productive maintenance: a textile case. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 94(1-4), 239-256. doi:10.1007/s00170- 017-0783-2