

Metodología aplicada para la determinación de niveles de automatización en manufactura de arneses

ANAYA-PÉREZ, María Elena^{†*}, CHAN-AMAYA, Alejandro, RODRÍGUEZ-VEGA, Graciela y PACHECO-RAMÍREZ, Jesús Horacio

Recibido Octubre 26, 2017; Aceptado Diciembre 15, 2017

Resumen

La migración hacia procesos más eficientes es una opción común entre las empresas al buscar incrementar la productividad y competitividad, siendo la tecnología de la automatización una herramienta útil para tal fin. La consideración respecto a la decisión de si una tecnología es la adecuada y si el nivel de automatización cumple con las necesidades y objetivos de la empresa, son puntos indispensables para determinar la inversión e implementación de equipos automatizados exitosamente. Este trabajo presenta la aplicación de una metodología propuesta a un caso de estudio llevado a cabo en una empresa fabricante de partes para la industria automotriz. Las estaciones de trabajo incluyen áreas dedicadas al enteipado de arneses, siendo susceptibles a errores. La finalidad de esta aplicación es proporcionar una propuesta de opciones de automatización en distintos niveles, y sugerir el tipo de equipo a involucrar en el diseño y la implementación de un sistema automatizado flexible, así como una aproximación de la inversión a realizar para cada caso. Finalmente, en los resultados, se presentan los niveles de automatización obtenidos con la opción seleccionada por la empresa, de acuerdo a su criterio particular de evaluación.

Nivel de automatización, sistema flexible automatizado, enteipado

Abstract

The migration to more efficient processes is a common option among companies when seeking the increase in productivity and competitiveness, with automation technology being a useful tool for this purpose. Consideration regarding the decision as to whether a technology is adequate and whether the level of automation meets the needs and objectives of the company are indispensable points to successfully determine the investment and implementation of automated equipment. This paper presents the application of a methodology proposed to a case study carried out in a manufacturer of parts for the automotive industry. The workstations include areas devoted to the The purpose of this application is to provide a proposal for automation options at different levels and to suggest the type of equipment to be involved in the design and implementation of a flexible automated system, as well as an approximation of the investment to be made for each case. Finally, in the results, the levels of automation obtained with the option selected by the company are presented, according to its particular evaluation criterion.

Level of automation, automated flexible system, tapping

Citación: ANAYA-PÉREZ, María Elena, CHAN-AMAYA, Alejandro, RODRÍGUEZ-VEGA, Graciela y PACHECO-RAMÍREZ, Jesús Horacio. Metodología aplicada para la determinación de niveles de automatización en manufactura de arneses. Revista de Aplicaciones de la Ingeniería 2017, 4-13: 41-51

*Correspondencia al Autor:(Correo Electrónico: elena.anaya@unison.mx)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

Introducción

Las estrategias de ensamble de producción básicas se clasifican en: sistemas de ensamble manual, sistemas de ensamble flexibles automatizados, y sistemas de ensamble dedicados automatizados. Estos tres sistemas pueden ser clasificados de acuerdo a sus diseños básicos, flexibilidad, tamaño de lote, volumen de producción y número de variantes. Para unir los requerimientos de producción y flexibilidad, se han desarrollado e implementado sistemas innovadores de ensamble flexibles y automáticos (FAS, por sus siglas en inglés). Esos sistemas se han hecho flexibles gracias a las mejoras realizadas en la tecnología robótica y en los sistemas de control junto con hardware/software para visión artificial. El principal motivante para llevar a cabo el diseño y el desarrollo de FAS es minimizar los costos unitarios de producción, aunque puede ser contraproducente si el sistema no es correctamente diseñado y administrado, aumentando los costos de la automatización (Rosati, Faccio, Carli & Rossi, (2013).

En la literatura se encuentra que, para hacer una cercana vinculación entre hombre y máquina en tareas de ensamble cooperativas, se debe hacer uso de los puntos fuertes de ambos lados (Lien & Verl, 2009). Normalmente, un sistema de ensamble automatizado ofrece algunas ventajas tales como el funcionamiento sin interrupciones, alta productividad para tareas de montaje simples, y la reducción significativa o en su totalidad de la fatiga del trabajador. Por otro lado, un ser humano proporciona capacidades sensoriales incomparables para tareas de manipulación complejas, y es capaz de adaptarse rápidamente a las nuevas secuencias del proceso, pero está restringido en fuerza y precisión. Las estaciones de trabajo cooperativas combinan las ventajas de un sistema humano y uno automatizado (Zanchettin, Ceriani, Rocco, Ding & Matthias, 2016).

Una de las claves para una inversión e implementación de equipos automatizados exitosa, es la elección de la tecnología adecuada, el tipo y nivel de automatización que mejor se adapte a la empresa, sus necesidades, sus objetivos y los requisitos previos (Friedler, Salonen & Johansson, 2013).

Se tiene la idea de que la mayoría de los procesos automatizados en manufactura, implican solamente la automatización de tareas mecánicas. Sin embargo, esas tareas son controladas principalmente por computadoras para un rendimiento óptimo. Por lo tanto, es importante reconocer que la automatización en la fabricación puede ser vista como dos clases básicas de automatización: primera mecanización, y segunda informatización. La figura 1 muestra la separación de estas dos clases. La informatización se define como la sustitución de las tareas cognitivas, tales como los procesos sensoriales humanos y la actividad mental. Con la mecanización se entiende a la sustitución de la potencia muscular humana, como la transformación de materiales y energía (Frohm, Lindström & Bellgran, 2005).

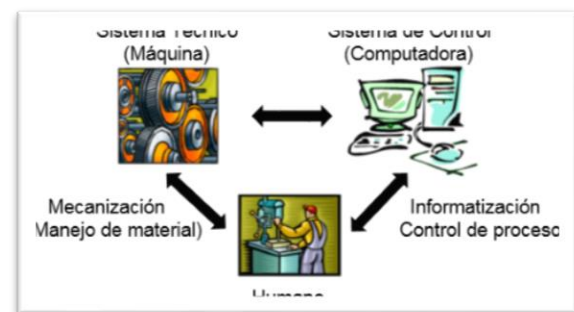


Figura 1 Separación de clases en mecanización e informatización

Investigaciones han demostrado la importancia de la integración de los seres humanos y la tecnología en la manufactura automatizada, para el apoyo a los sistemas de manufactura sostenibles y robustos.

La relación entre los seres humanos y la tecnología puede ser vista como actividades que se realizan de forma totalmente manual a completamente automatizadas compartiendo las tareas entre el ser humano y la tecnología. Este concepto se denomina niveles de automatización (LoA, por sus siglas en inglés) y se refiere a tareas mecanizadas y cognitivas asignadas en una escala de referencia del 1 al 7 como se muestra en la tabla 1. (Lindström & Winroth, 2010).

LoA	Mecánico y equipo	Información y control
1	Totalmente manual	Totalmente manual
2	Herramienta estática de mano	Decisión
3	Herramienta flexible de mano	Enseñanza
4	Herramienta automática de mano	Cuestionamiento
5	Máquina estática	Supervisión
6	Máquina flexible	Intervenir
7	Totalmente automatizado	Totalmente automatizado

Tabla 1 Niveles de automatización (LoA)

En Fasth, Stahre y Dencker (2008), se propone una metodología basada en la tabla 1. Entre algunos estudios que se han realizado para aplicar esta metodología, se tiene el presentado por los autores Windmark, Gabrielson, Andersson y StCEhl (2012), en el cual se concluyó que el factor de automatización no es una variable definida, ya que varía para cada sistema de producción y esto depende de donde se encuentre el proceso. Otro estudio fue el presentado por los autores Morioka y Sakakibara (2010), para un nuevo diseño de celda interactuando un robot y un operador humano para realizar tareas en colaboración, concluyendo que la nueva celda de producción acelera la velocidad a la cual un operador puede trabajar y reduce los errores de ensamble.

La presente investigación se ha realizado teniendo la oportunidad de presentar la metodología propuesta por Fasth et al. (2008), en una aplicación real. Esta aplicación fue presentada como un problema a resolver y se solicitó una propuesta de solución para determinar el nivel o niveles de automatización adecuados para un proceso de enteipado de arneses. Hasta la documentación de este artículo se han obteniendo resultados satisfactorios en la etapa de simulación, que se espera vayan dirigidos a un diseño e implementación que logren los objetivos de la empresa.

Metodología

La metodología para la medición del nivel de automatización de los sistemas de ensamble está basada, de acuerdo a Fasth et al. (2008), en el proyecto DYNAMO con algunas adecuaciones, y ha servido como fundamento para mostrar el desarrollo en las etapas de medida y análisis con las cuales se ha proporcionado una visualización del sistema de ensamble. En la figura 2 se muestra el diagrama de la metodología con cada uno de sus pasos, así como la secuencia que ha de seguirse a lo largo del proyecto. Esta metodología, como se puede observar, tiene una secuencia y orden definidos, sin embargo en cualquier momento es posible regresar a pasos previos, lo que depende de los resultados que se vayan obteniendo a lo largo de la implementación del proyecto. Se cuenta con cuatro fases y cada una de ellas con varias actividades a realizar.

A continuación, se presenta el desarrollo de cada una de las fases, presentadas en el diagrama de la figura 2, aplicadas al caso de estudio con la finalidad de que el lector pueda apreciar la aplicación de la metodología.

Fase 1: Pre-estudio

Esta fase tiene como objetivo definir la situación actual del proceso en estudio y conocer las características del centro del trabajo. Para poder lograr lo anterior se realizaron varias visitas al centro de trabajo, se estudiaron parámetros como el tiempo de ciclo de cada operación, el flujo del material, se obtuvo información sobre la demanda para los productos que se fabrican en ese centro de trabajo, y se tomó video para estudio a detalle.

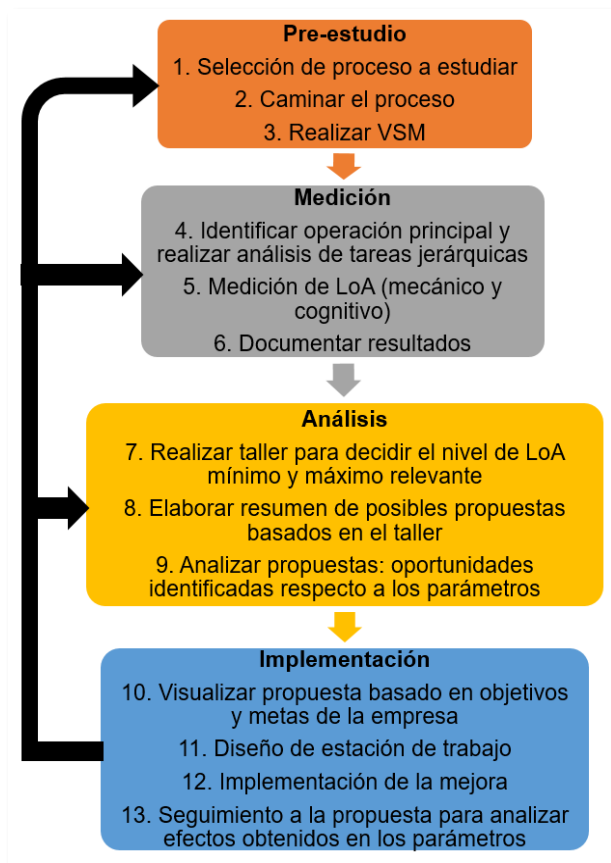


Figura 2 Diagrama de la metodología para la medición del nivel de automatización de los sistemas de ensamble

Para realizar la etapa de selección de proceso a estudiar, se tomaron en cuenta los factores de factibilidad, dificultad de automatización y objetivos de la empresa.

Por solicitud de la empresa, se seleccionó un centro de trabajo en el cual se manufacturan arneses, mismos que son enteipados en su totalidad y requieren del ensamble de diferentes componentes en sus extremos. Este centro de trabajo produce una familia de productos conformada por cinco números de parte distintos, cuya principal variante es la longitud del arnés.

Una vez definido el proceso a estudiar, se sigue con la segunda etapa, en la que se lleva acabo un recorrido por el proceso con la finalidad de conocer cómo funciona. Es necesario conocer el número de operadores con que se cuenta, el flujo que tienen las piezas dentro del proceso, así como los tiempos de ciclo de cada operación.

La tercera etapa sugiere realizar un Mapeo de la Cadena de Valor (VSM por sus siglas en inglés), sin embargo, debido al tipo de estación de trabajo seleccionada, el VSM fue sustituido por el diagrama de layout del proceso del centro de trabajo mostrado en la figura 3, que incluye el número de operadores y flujo de proceso, entre otra información relacionada al centro de trabajo.

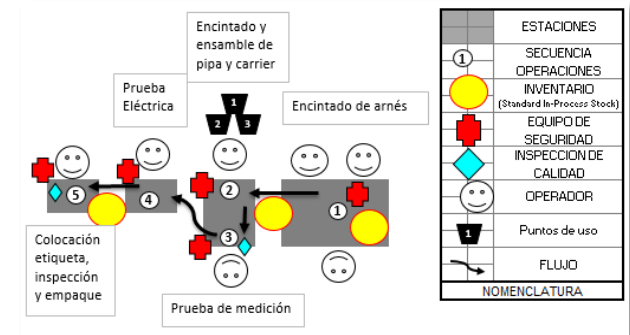


Figura 3 Diagrama de layout de proceso en estudio

Fase 2: Medición

En esta fase se pretende estudiar cada uno de los movimientos que realiza el operador en las estaciones de trabajo y medir el nivel actual de automatización que las estaciones de trabajo presentan. Con información de tareas jerárquicas proporcionada por la empresa, se analizaron y estudiaron los diferentes movimientos utilizados en cada operación con la finalidad de visualizar los movimientos que se podrían aplicar a los niveles de automatización. En este análisis se utilizó el video filmado en la fase 1. El resultado que arrojó ese análisis sobre los tiempos de movimientos se aprecia en la tabla 2.

Operación	Seg. Ciclo	Asignación por Operadores				
		1	2	3	4	5
Tomar cable	1.0	1.0				
Quitar cinta	9.3	9.3				
Colocar arnés en fixture	2.3	2.3				
Tomar cinta	0.7	0.7				
Encintar	31.3	31.3				
Enrollar cable	0.7	0.7				
Mover cable terminado	1.3	1.3				
Tomar cable	3.0		3.0			
Colocar arnés	11.0		11.0			
Colocar zapeta	15.0		15.0			
Quitar arnés	4.0		4.0			
Colocar carrier	6.0		6.0			
Colocar cable terminado	4.0		4.0			
Toma de cable	6.0			6.0		
Inspección de arnés principal	8.0			8.0		
Inspección de ramificaciones	9.0			9.0		
Inspección de carriers	10.0			10.0		
Embobinado	10.0			10.0		
Colocar producto terminado	2.0			2.0		
Tomar cable	4.0				4.0	
Colocar arnés en fixture	9.0				9.0	
Prueba eléctrica	8.0				8.0	
Quitar arnés de fixture	4.0				4.0	
Tomar cable	1.0					1.0
Inspección de carrier	10.0					10.0
Colocar etiqueta	6.0					6.0
Embobinar	8.0					8.0

Tabla 2 Tiempos de cada movimiento realizado

Mediante los tiempos de operación de cada uno de los movimientos que realizan los operadores en las diferentes estaciones, se obtuvo la gráfica 1, en la cual se observa que la tarea de encintado (color naranja en las barras del operador 1), es la de tiempo más extenso, lo que significa que cualquier cambio que se realice a esta operación representará un cambio significativo en el ritmo de producción.

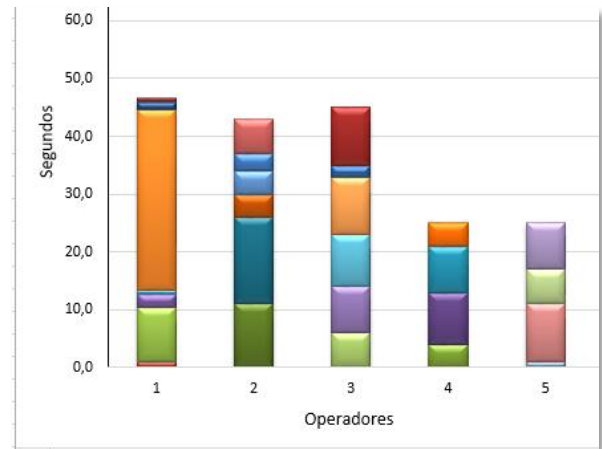


Gráfico 1 Grafico de los tiempos de cada movimiento

La etapa cinco referente a la medición del nivel de automatización, es importante realizarla antes de iniciar con la implementación de cambios en el centro de trabajo, ya que es necesario conocer en qué estado o nivel de automatización se encuentra, así se observó de qué manera se hace el trabajo y cómo se maneja la información para la toma de decisiones. En este caso se consideró una estación del centro de trabajo, ya que es en la que se pretende implementar la mejora. La figura 4 muestra una fotografía de como se realiza el trabajo y qué es lo que se utiliza para llevar a cabo esta operación. De acuerdo a la tabla 1, la operación de interés, encintado, puede ser considerada en el nivel 1 de automatización en la sección mecánica, ya que el trabajo es totalmente manual y lo único que ayuda al operador es un dispositivo para sujetar el extremo sin utilizar herramientas manuales.

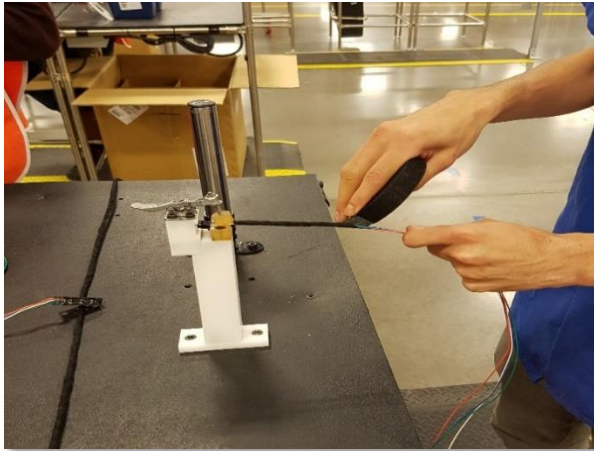


Figura 4 Operación de encintado

En lo que respecta a la manera en la que se toman las decisiones, los operadores tienen órdenes e instrucciones de trabajo previamente definidas utilizadas para realizar sus actividades. Según los autores Lindström y Winroth (2010), el utilizar solo una orden de trabajo como decisión se considera que se encuentra en el nivel 3 de automatización en la sección de información, así, con estos dos resultados se concluye que la estación de encintado se encuentra en el nivel 1-mecánico y nivel 3-información, por consiguiente a partir de esos niveles se toma el punto de inicio para realizar las propuestas de solución, descartando las que se encuentren en niveles anteriores a este.

Antes de pasar a la siguiente fase, se tiene la etapa seis de la fase 2, en la que se documentan los resultados y lo cual ha sido presentado anteriormente.

Fase 3: Análisis

En esta fase se determinó el nivel mínimo y máximo de automatización en el que se ubica a la estación bajo estudio, con esto se pretenden desarrollar las opciones a presentar a la empresa y analizar cuál podría ser la indicada para implementar.

Para asignar los niveles mínimos y máximos de automatización, en la fase 2 se determinó el estado actual de la estación como nivel 1 en trabajo mecánico y nivel 3 en trabajo cognitivo o de información. El nivel 7 mecánico y de información no fue factible ya que esa estación surte a otras áreas.

Otros factores a considerar respecto a las metas de la empresa es que desea modificar la operación de enteipado actual, tomando en cuenta que se lleve a cabo por un sistema de encintado semiautomático o automático, por lo que como mínimo debe estar en nivel 4 de tarea mecánica.

Teniendo en cuenta lo anterior, se determinó que el nivel de automatización mínimo era 4 para tareas mecánicas y 3 para tareas cognitivas y como máximo 6 para ambas tareas, obteniendo la tabla 3 en la cual se muestra de forma resumida la información proporcionada.

LoA	Mecánico	LoA	Información
4	Herramienta de mano automatizada.	3	Enseñanza
5	Máquina estática/estación de trabajo.	4	Cuestionamiento
6	Máquina flexible/estación de trabajo.	5	Supervisión
-	-	6	Intervenir

Tabla 3 Nivel relevante mínimo y máximo de automatización

Se procede a obtener las propuestas de diferentes mejoras, teniendo determinado el nivel mínimo y máximo de automatización relevante, se realiza un cuadro de posibles propuestas para dar solución al problema con el que se está trabajando, quedando como se observa en la tabla 4.

Mecánico	Información
Herramienta de mano automatizada	Instrucción de trabajo.
	Sistema que cuestione si la operación está lista para comenzar.
	Alarma en caso de un mal funcionamiento.
	Sistema que corrija errores de forma automática.
Máquina estática/estación de trabajo	Instrucción de trabajo.
	Sistema que cuestione si la operación está lista para comenzar.
	Alarma en caso de un mal funcionamiento.
	Sistema que corrija errores de forma automática.
Máquina flexible/estación de trabajo	Instrucción de trabajo.
	Sistema que cuestione si la operación está lista para comenzar.
	Alarma en caso de un mal funcionamiento.
	Sistema que corrija errores de forma automática.

Tabla 4 Información sobre opciones de propuestas

Se tienen doce posibles propuestas para resolver el problema, sin embargo, no se asegura su factibilidad debido a que algunas no se podrán llevar a cabo de forma física debido a la naturaleza del proceso, ya que es necesario que para cada una de las propuestas (si es posible aplicarse de forma física) se lleve a cabo una evaluación de los costos de la inversión para poder ser aplicado.

La etapa nueve sobre el análisis de propuestas de mejoras se lleva a cabo una vez que se tiene el cuadro de posibles soluciones. Conforme a esto se comenzó por buscar tecnología que pudiera realizar ese trabajo. Entre ellas se encontró máquinas enteipadoras de mano y enteipadoras montables de mesa, ambas automáticas (figura 5). Debido a que cualquiera de esas dos opciones cumple perfectamente con el nivel mínimo de automatización requerido, se decidió por la presentada en la figura 5 b), enteipadora automática montable de mesa.

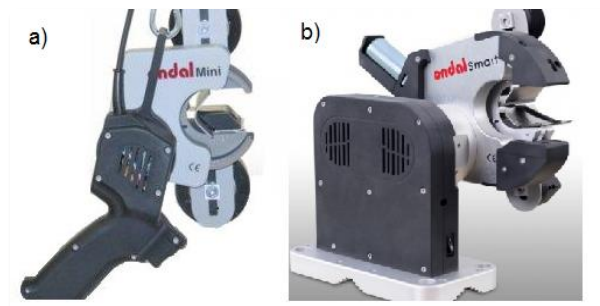


Figura 5 a) Enteipadora automática de mano, b) Enteipadora automática montable de mesa

Esta opción representa el nivel más bajo permisible para la implementación, por lo que fue considerada para elaborar las propuestas económicas derivadas para el incremento de los niveles de automatización, las cuales se muestran en la tabla 5.

Opción de Sistema	Descripción y Observaciones	Costo
1 Enteipadora automática con instrucción de trabajo.	a) Presión de pedal regulador de velocidad de máquina, por operador, a la vez que coloca el arnés en la máquina y lo desplaza a su ritmo. b) Operador con acceso a instrucciones de operación.	\$USD8000
2 Enteipadora automática y sensores de posición.	Además de lo descrito en la opción 1 a), detección de colocación incorrecta del arnés, a través de un sistema de sensores.	\$USD8350
3 Enteipadora automática con control de velocidad automático.	Adicional a la opción 2, tendrá predeterminada la velocidad de giro de la enteipadora.	\$USD9100
4 Enteipadora con control de velocidad automático y sistema de movimiento lineal.	Control de velocidad de giro y de movimiento lineal por el sistema para realizar el enteipado. Dispositivos de seguridad.	\$USD12500
5 Enteipadora con control de velocidad automática y sistema de velocidad automática con pantalla.	En esta solución, el giro de la enteipadora y el movimiento lineal serán automáticos. Sistema capaz de identificar la posición y detenerse cuando haya recorrido la distancia deseada. Componentes principales: servomotor, controlador, PLC y pantalla, con el objetivo de registrar diferentes números de parte. Dispositivos de seguridad.	\$USD25500

Tabla 5 Análisis de propuestas y precios.

Fase 4: Implementación

En esta última fase se realizó la selección del sistema a implementar, con el análisis de las diferentes propuestas obtenidas en la fase tres. En un análisis sencillo, se puede seleccionar la propuesta de menor requerimiento económico. No obstante, el costo de implementación no es el único factor que la industria toma en cuenta para la selección de la propuesta, por lo que la empresa seleccionó la opción 5 de las propuestas indicadas en la tabla 5, para ser implementada. La decisión se fundamentó en lo siguiente:

- El trabajo se realizará de forma estándar, debido a que la operación tiene más alto nivel de automatización y el operador se involucra menos en ella.
- Posibilidad de incremento en la variedad de números de parte a manufacturar de este tipo de proceso, los cuales actualmente son manufacturados en otras plantas de forma manual.
- Reducción de cantidad de operadores: actualmente se requieren 3 operadores en la estación de trabajo bajo estudio. Mediante la implementación de la propuesta de automatización se necesitará solamente un operador.
- Disminución del nivel de riesgo ergonómico, mismo que impactará directamente en la salud del trabajador y por ende, tendrá un efecto positivo en los indicadores de número de errores y lesiones.

Resultados

Para efectos del análisis del funcionamiento de la línea de producción, después de la implementación se realizó una simulación utilizando el software FlexSim.

En la figura 6 se puede observar la corrida de la simulación y el flujo del producto. En la gráfica 2 se presentan los tiempos y la cantidad de producto que se encuentra en trabajo en proceso y en la gráfica 3 se observa el porcentaje del tiempo de procesamiento y el de tiempo de espera de los operadores. En la gráfica 3, el proceso de encintado sería la implementación que se propone teniendo un 95.0% del tiempo procesando. Por otro lado, las operaciones de prueba eléctrica y etiquetado tienen un tiempo de trabajo de: 36.2% y 57.0% respectivamente.

En el gráfico 2 se presentan los tiempos y la cantidad de producto que se encuentra en proceso.

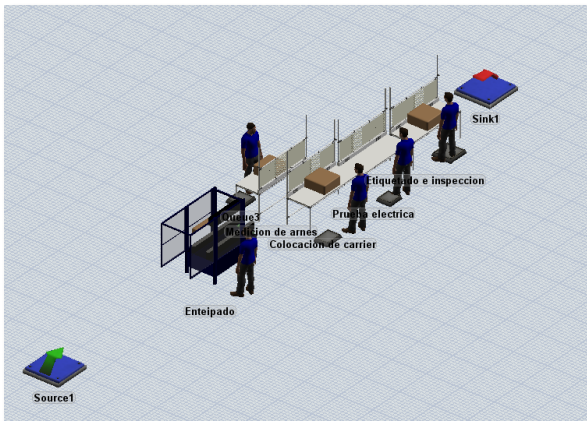


Figura 6 Simulación de la línea de producción de enteipado de arnés

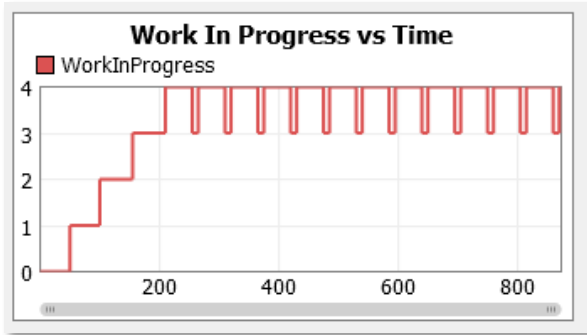


Gráfico 2 Trabajo en proceso contra tiempo

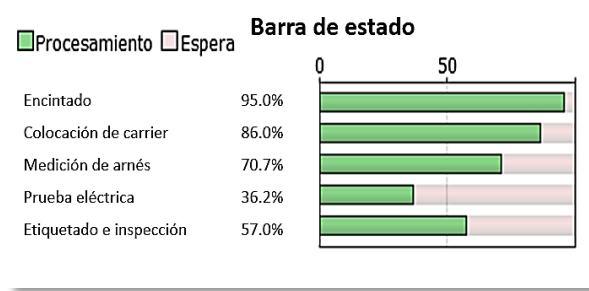


Gráfico 3 Porcentaje de tiempo de procesamiento y tiempo de espera del operador

Es oportuno tomar en cuenta la eficiencia para disponer de otro factor cuantitativo a considerar en la toma de decisiones. La empresa determina la eficiencia de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\% Ef = (Hrs. ganadas / Hp) * 100 \quad (1)$$

En donde *Hrs. ganadas* son las horas estándar representadas por la producción obtenida y *Hp* son las horas promedio reales invertidas en esa producción. Sustituyendo en la ecuación (1) las horas invertidas promedio de 9 observaciones tomadas en la operación de encintado (procedimiento interno de la empresa) y obteniendo una producción equivalente a 22.7 horas ganadas, se tiene lo siguiente:

$$\% Ef = (22.7/44.7)(100) = 51\%$$

La eficiencia esperada de la estación de encintado, de acuerdo a los resultados de la simulación observados en la gráfica 3, sería del 95.0%.

Discusión de resultados

La figura 3 muestra que en total, la operación de enteipado tiene tres operadoras, una en prueba eléctrica, otra en etiquetado y una más en inspección.

En los resultados obtenidos (gráfica 3), el proceso de enteipado con la opción de nivel de automatización 5, tendría una eficiencia del 95.0 %, lo que representa un fuerte impacto en la capacidad de producción de la estación y disminución del porcentaje de tiempo de ocio. También debe observarse, que la operación de prueba eléctrica y etiquetado tienen un tiempo de espera bastante elevado con 36.2% y 57.0% respectivamente. Otra parte a considerar, es la evaluación de la inversión a efectuar respecto al tiempo de recuperación, que de acuerdo al análisis llevado a cabo por la empresa (confidencial), sería de un año.

Agradecimiento

Los autores agradecen a la Universidad de Sonora y a la empresa en donde se llevó a cabo la aplicación de la metodología, por el apoyo brindado para la realización del presente trabajo.

Conclusiones

Con este trabajo de aplicación de la metodología para determinar las opciones de nivel de automatización en la manufactura de arneses, específicamente en la operación de enteipado, se muestra la viabilidad para la implementación de las propuestas de automatización. Es importante mencionar la gran utilidad de la metodología empleada, para lograr una adecuada visualización de las distintas oportunidades de mejora, que muestre el detalle necesario para llevar a cabo toma de decisiones en beneficio de la mejora en el proceso de manufactura. En el caso de estudio considerado en la presente investigación, se logró una reducción de tres a una operadora.

En la discusión se menciona el alto porcentaje de tiempo muerto en las operaciones de prueba eléctrica y de etiquetado e inspección, con un promedio aproximado, entre ambos casi del 50%, por lo cual como trabajo futuro, se planea tomar estas áreas para aplicar la metodología con la finalidad de analizar y evaluar las opciones que de ese estudio se deriven. Al igual que la evaluación económica del cambio a la opción de nivel de automatización seleccionada. Es también importante mencionar que introducir un análisis ergonómico para cada nivel de automatización obtenido, es otra área de futura actividad para continuar probando y mejorando la metodología.

Referencias

- Fasth, Å., Stahre, J. & Dencker, K. (2008). Measuring and analysing Levels of Automation in an assembly system. In *Manufacturing Systems And Technologies For The New Frontier*, 1, pp.169-172. https://doi.org/10.1007/978-1-84800-267-8_34
- Friedler, N., Salonen, A., & Johansson, C. (2013). The automation equipment acquisition process – experienced users’ perspective. In *International Conference on Production Research. 22nd International Conference on Production Research*. Recuperado en <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:mdh:diva-22287>.
- Frohm, J., Lindström, V. & Bellgran, M. (2005). A model for parallel levels of automation within manufacturing. *Proceedings of the 18th International Conference on Production Research*. Fisciano, Italy.
- Lien, T. & Verl, A. (2009). *CIRP Annals - Manufacturing Technology Cooperation of human and machines in assembly lines*. Volumen 58, pp.628–646.

Lindström, V. & Winroth, M. (2010). Aligning manufacturing strategy and levels of automation: A case study. *Journal of Engineering and Technology Management - JET-M*. 27(3–4), pp. 148–159.

Morioka, M. & Sakakibara, S. (2010). A new cell production assembly system with human–robot cooperation.pdf.

Rosati G., Faccio M., Carli A. & Rossi A. (2013). Fully flexible assembly systems (F-FAS): a new concept in flexible automation. *Assembly Automation*. Volumen 33. Issue: 1, pp.8-21. <https://doi.org/10.1108/01445151311294603>

Windmark, C., Gabrielson, P., Andersson, C., & StCEhl, J.E. (2012). A Cost Model for Determining an Optimal Automation Level in Discrete Batch Manufacturing, *Procedia CIRP* (3), pp.73-78. ISSN 2212-8271, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2012.07.014>

Zanchettin, A., Ceriani, N., Rocco, P., Ding, H. & Matthias, B. (2016). Safety in Human-Robot Collaborative Manufacturing Environments : Metrics and Control. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering* . Volumen 13(2), pp.882–893. DOI: 10.1109/TASE.2015.2412256.